



## **Otimização energética à secção das malhas**

Joana Raquel Teixeira Ferreira

Novembro de 2015

### Orientadores Empresa:

Engº José Ricardo Osório  
Engº Joaquim Rocha

### Orientadores ISEP:

Engª Anabela Guedes  
Engª Maria Paula Neto



## Agradecimentos

Durante estes meses de estágio tive a oportunidade de conhecer diversas pessoas e poder contar com o seu apoio que, de uma forma direta ou indireta, me ajudaram na elaboração da presente dissertação.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Continental-Indústria Têxtil do Ave, S.A. pela oportunidade da realização desta dissertação nas suas instalações.

Aos meus orientadores na empresa, Eng<sup>o</sup> Joaquim Rocha e Eng<sup>o</sup> José Ricardo Osório, pela forma como me receberam e por todo o apoio prestado ao longo destes 9 meses de estágio.

Às minhas orientadoras no ISEP, Eng<sup>a</sup> Anabela Guedes e Eng<sup>a</sup> Paula Neto, agradeço todo o apoio, ajuda e preocupação demonstrados durante o meu estágio e elaboração do presente documento.

Ao Eng<sup>o</sup> Rafael Castro agradeço a sua constante ajuda e disponibilidade para todas as minhas dúvidas.

Aos meus colegas de gabinete, Álvaro Ferreira e Hélder Ribeiro, agradeço toda a ajuda, disponibilidade e bons momentos que me proporcionaram.

Em particular ao Hélder Ribeiro agradeço toda a dedicação e ajuda para a elaboração deste relatório.

Aos operadores da râmula e a todos os restantes o meu muito obrigado por me terem recebido tão bem e por todo o apoio prestado.

Aos meus pais, pela preocupação, pela educação, pelo afeto, pelas oportunidades e por nunca me negarem nada que realmente precisasse.

À minha irmã, pelo carinho e pelos conselhos. Ao Bruno Saraiva, pela animação e exemplo a seguir. Por estarem sempre prontos a apoiarem.

Ao Ricardo Almeida agradeço todo o carinho, dedicação e paciência que demonstrou ao longo desta jornada, que sem ele não seria possível a escrita deste documento.

A todos os que não foram referidos mas que foram imprescindíveis para esta jornada.

A Todos Muito Obrigada.



## Sumário

A presente dissertação realizada na empresa Continental-Indústria Têxtil do Ave, S.A., teve como objetivo a otimização energética da secção das malhas.

Esta secção divide-se em duas áreas, a tricotagem e a ramulagem. Os artigos produzidos diferem no seu peso específico, composição e condições de operação, sendo os artigos A, B e C compostos por poliéster e termofixados a 190°C e os artigos D e E compostos por poliéster e algodão, com uma temperatura de operação de 205°C.

Numa primeira etapa estudou-se o funcionamento da máquina de termofixação – a râmula – que opera em trabalho contínuo a 40 m/min. Esta máquina tem incorporado um permutador de calor, que aquece o ar fresco de entrada com os gases de exaustão das estufas.

Posteriormente efetuou-se o levantamento energético de cada artigo, para as áreas de tricotagem e ramulagem. Verificou-se que os artigos D e E, pela sua constituição, são os que apresentam um consumo específico superior, em tep/ton.

Entre as várias utilidades consumidas (gás natural, eletricidade e ar comprimido) o gás natural representa mais de 50% do consumo de energia total necessário para a produção de cada artigo.

Após a completa análise aos consumos energéticos da râmula, foram realizados ensaios de otimização, tendo-se concluído que a diminuição do caudal de exaustão pode atingir valores de poupança anual de gás natural na ordem dos 3.000 €.

Com o objetivo de avaliar o consumo de gás natural, não sendo possível a realização experimental, foram feitas simulações com base em alterações na corrente de entrada de ar fresco no permutador. Foi também estudada a possibilidade de isolamento e revestimento térmico da conduta exterior, projetada para o reaproveitamento do ar dos compressores, tendo-se obtido um orçamento de 2.500 €.

Admitindo-se uma gama de temperaturas entre os 40°C e os 60°C, com um caudal de insuflação de 30%, obteve-se um payback entre os 0,97 e os 3,28 anos. Numa segunda fase admitiu-se uma temperatura média de 50°C, aumentando o caudal de insuflação até 100%. O período de retorno obtido variou entre os 0,33 e os 1,38 anos, podendo as poupanças anuais atingirem os 7.600 €.

Palavras – chave: termofixação, râmula, gás natural, otimização energética.



## **Abstract**

This master thesis carried out on Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A., had as primal goal the energy optimization of the mesh section.

This section is divided in two areas: knitting and thermofixation. The produced articles differ between them in constitution, specific weight and operating conditions, being A, B and C made of polyester and thermofixated at 190°C and D and E of cotton and polyester with 205°C as the operating temperature.

On a first approach it was studied the functioning of the thermofixation machine – the stenter frame – which operates in continuous work at 40 m/min. This machine has incorporated a heat exchanger that heats the fresh air with the exhaust gases.

Thereafter it was carried out the energy survey of each article for the knitting and thermofixation areas. It was noted that items D and E, because of its constitution, are the ones with the highest specific consumption.

Among the several consumed utilities (natural gas, electricity and compressed air), natural gas represents over 50% of total energy consumption required to produce each item.

After a complete analysis of the energy consumption on the stenter frame, optimization tests were performed and it was concluded that decreasing the exhaust flow can achieve annual savings, for natural gas, rounding 3.000€.

In order to check the natural gas consumption and having in mind that experimental tests weren't possible, some variations of the fresh air flow and temperature were simulated. It was also studied the possibility of insulation of the exterior conduct designed for the reuse of the compressors heat air, obtaining a budget of 2.500€.

Admitting a range of temperatures between 40°C and 60°C with 30% of insufflation flow rate, the investment payback is between 0,97 and 3,28 years.

On a second stage, assuming 50°C as the fresh air temperature and increasing the insufflation flow rate, the payback period obtained is now between 0,33 and 1,38 years, with annual savings reaching 7.600€.

Key-words: thermofixation, stenter frame, natural gas, energetic optimization.





## Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Organização do relatório.....	1
1.2. Apresentação da empresa.....	1
1.3. Enquadramento do trabalho .....	4
1.4. Auditorias Energéticas.....	4
1.5. Objetivos do trabalho.....	5
2. Área das malhas.....	7
2.1. Tricotagem .....	8
2.2. Ramulagem .....	8
2.3. Projeto de aproveitamento de ar quente .....	17
3. Avaliação Energética à Área das Malhas.....	21
3.1. Levantamento Energético .....	23
3.2. Consumos Específicos .....	28
3.3. Influência da temperatura e humidade.....	34
3.4. Conduta de aproveitamento de ar quente.....	36
3.5. Balanço de massa à râmula .....	38
3.6. Balanço de energia à râmula .....	39
4. Otimização Energética.....	41
4.1. Ensaios de otimização efetuados .....	41
4.1.1. Estudo da influência dos registos mecânicos.....	42
4.1.2. Estudo da influência da diminuição da exaustão .....	43
4.1.3. Estudo da influência dos registos mecânicos e diminuição da exaustão.....	43
4.2. Ensaios de otimização simulados .....	44
4.2.1. Estudo da influência do aumento da temperatura de entrada no permutador .....	45
4.2.2. Estudo da influência do aumento da ventilação de entrada do ar no permutador .....	46
4.3. Análise Económica .....	47

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	53
Bibliografia.....	55
Anexo A – Consumos energéticos dos artigos.....	57
Anexo B – Consumos Específicos .....	59
Anexo C – Análise das temperaturas.....	62
Anexo D – Características do ar .....	65
Anexo E – Balanços .....	67
Anexo F – Ensaio de otimização simulados .....	71
Anexo G – Análise Económica.....	73
Anexo H – Tabelas de valores .....	78

## Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Condições de operação nos teares estabelecidas para cada artigo.....	22
Tabela 3.2 - Condições de operação na râmula estabelecidas para cada artigo.....	23
Tabela 3.3 - Sistema de abertura dos registos mecânicos para cada estufa.....	23
Tabela 3.4 - Potência da energia elétrica e ar comprimido dos artigos na tricotagem .	27
Tabela 3.5 - Potência consumida pelos artigos na termofixação.....	27
Tabela 3.6 - Temperaturas obtidas na condução de aproveitamento de ar quente.....	36
Tabela 3.7 - Caudais mássicos das correntes .....	39
Tabela 3.8 – Perdas térmicas do sistema para cada artigo produzido .....	40
Tabela 4.1 – Variação da abertura dos registos mecânicos – Ensaio 1 .....	42
Tabela 4.2 - Variação da abertura dos registos mecânicos – Ensaio 2 .....	42
Tabela 4.3 – Diminuição da percentagem de exaustão.....	43
Tabela 4.4 – Diminuição da abertura dos registos mecânicos com diminuição da exaustão .....	43
Tabela 4.5 – Potência do gás natural com o aumento da temperatura do ar de entrada .....	45
Tabela 4.6 - Potência de consumo de gás natural com o aumento do caudal de insuflação, para $T=50^{\circ}\text{C}$ .....	46

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Continental – Indústria Têxtil do Ave S.A. (C-ITA) [1].....	2
Figura 2.1 - Esquema do processo produtivo das malhas.....	7
Figura 2.2 – Vista frontal da râmula. ....	9
Figura 2.3 – Vista posterior da râmula. ....	9
Figura 2.4 - Vaporizador de V. ....	10
Figura 2.5 – Esquema representativo das tubeiras no interior da estufa. ....	10
Figura 2.6 – Esquema representativo do queimador de uma estufa. ....	11
Figura 2.7 – Esquema representativo da posição do queimador com as tubeiras no interior da estufa. ....	11
Figura 2.8 – Esquema de um injetor. ....	11
Figura 2.9 – Vista inferior de um injetor.....	12
Figura 2.10 – Esquema da unidade de ventiladores das estufas. ....	12
Figura 2.11 – Corte transversal da râmula. ....	12
Figura 2.12 - Sistema de aquecimento da Râmula – queimador .....	13
Figura 2.13 – Corte transversal da râmula para visualização do sistema tubular interno. ....	14
Figura 2.14 – Corte de cima da râmula para visualização da conduta interna.....	14
Figura 2.15 – Esquema representativo dos registos mecânicos. ....	15
Figura 2.16 – Esquema representativo da conduta de insuflação. ....	16
Figura 2.17 – Esquema representativo do processo de recuperação de calor. ....	16
Figura 2.18 – Esquema representativo da estrutura interna do sistema de recuperação de calor.....	17
Figura 2.19 – Vista de cima da ligação da conduta de aproveitamento de ar quente..	18
Figura 2.20 - Vista lateral da ligação da conduta de aproveitamento de ar quente. ....	18
Figura 2.21 – Esquema representativo da conduta exterior de ligação à râmula. ....	19
Figura 2.22 – Vista lateral da zona de entrega de ar quente. ....	19
Figura 2.23 – Esquema representativo da zona de entrega de ar quente. ....	19
Figura 3.1 – Caudalímetro instalado. ....	24
Figura 3.2 – Leitor de energia para a râmula. ....	24
Figura 3.3 – Analisador de energia portátil.....	25
Figura 3.4 – Contador de gás natural da râmula. ....	25
Figura 3.5 - Contador de gás natural da caldeira. ....	25
Figura 3.6 – Comportamento energético da râmula durante a fase produção/paragem. ....	26
Figura 3.7 - Fluxograma do consumo total do artigo A.....	28

Figura 3.8 - Distribuição do consumo por processo do artigo A. ....	29
Figura 3.9 - Fluxograma do consumo total do artigo B. ....	29
Figura 3.10 - Distribuição do consumo por processo do artigo B. ....	30
Figura 3.11 - Fluxograma do consumo total do artigo C. ....	30
Figura 3.12 - Distribuição do consumo por processo do artigo C. ....	31
Figura 3.13 - Fluxograma do consumo total do artigo D. ....	31
Figura 3.14 - Distribuição do consumo por processo do artigo D. ....	32
Figura 3.15 - Fluxograma do consumo total do artigo E. ....	32
Figura 3.16 - Distribuição do consumo por processo do artigo E. ....	33
Figura 3.17 – Variação do consumo de gás natural com o aumento da temperatura ambiente, para o artigo C .....	34
Figura 3.18 - Variação do consumo de gás natural com o aumento da humidade no ar do salão. ....	35
Figura 3.19 - Variação do consumo de gás natural com o aumento da temperatura do ar de entrada no permutador. ....	35
Figura 3.20 – Variação da temperatura média anual em Lousado, Vila Nova de Famalicão. ....	37
Figura 3.21 - Esquema das correntes mássicas intervenientes na râmula. ....	38
Figura 3.22 -Esquema da fronteira considerada para o balanço de energia. ....	40
Figura 4.1 – Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos (Ensaio 1 – Tabela 4.1). ....	48
Figura 4.2 - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos (Ensaio 2 – Tabela 4.2). ....	49
Figura 4.3 - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização de exaustão. ....	50
Figura 4.4 - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos e diminuição da exaustão. ....	50
Figura 4.5 – Variação do <i>payback</i> com a temperatura do ar de entrada no permutador. ....	51
Figura 4.6 - Variação do <i>payback</i> com o caudal de insuflação, com temperatura de entrada de 50°C. ....	52



## Nomenclatura

Variável	Designação	Unidades
<b>A</b>	Área do permutador	m <sup>2</sup>
<b>CE</b>	Consumo específico	kWh/kg; kWh/m; tep/ton
<b>Cp</b>	Capacidade calorífica	kJ/kg.K
<b>F</b>	Fator de correção da temperatura	---
<b>He</b>	Entalpia da corrente de entrada	kW
<b>Hi</b>	Entalpia da corrente de saída	kW
<b><i>m</i></b>	Caudal mássico	kg/s
<b>MM</b>	Massa Molar	g/mol
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior	kWh/m <sup>3</sup>
<b>PCS</b>	Poder calorífico superior	kWh/m <sup>3</sup>
<b>q</b>	Potência térmica	kW
<b>q<sub>f</sub></b>	Potência térmica fluido frio	kW
<b>q<sub>p</sub></b>	Potência térmica perdida	kW
<b>q<sub>q</sub></b>	Potência térmica fluido quente	kW
<b>T<sub>fe</sub></b>	Temperatura de entrada do fluido frio	°C
<b>T<sub>fs</sub></b>	Temperatura de saída do fluido frio	°C
<b>T<sub>qe</sub></b>	Temperatura de entrada do fluido quente	°C
<b>T<sub>qs</sub></b>	Temperatura de saída do fluido quente	°C
<b>U</b>	Coeficiente global de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> °C
<b><i>v</i></b>	Caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /h
<b>W</b>	Trabalho	J

## Letras gregas

Variável	Designação	Unidades
<b>ΣE<sub>e</sub></b>	Somatório das energias de entrada	kW
<b>ΣE<sub>s</sub></b>	Somatório das energias de saída	kW
<b>ΔH<sub>298</sub><sup>0</sup></b>	Calor libertado na combustão a 298K	kW
<b>λ<sub>298</sub></b>	Calor latente de vaporização a 298K	J/kg
<b>ε</b>	Eficiência térmica	---
<b>ΔT</b>	Diferença das temperaturas de entrada e saída	°C
<b>ρ</b>	Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>

## **Siglas**

A.C. – Ar Comprimido

APCER – Associação Portuguesa de Certificação

E.E. – Energia Elétrica

FAD – Free Air Delivered

G.N. – Gás Natural

NTU<sub>min</sub> – Número de unidades de transferência mínimas

Tep – Toneladas equivalentes de petróleo

Ton – Toneladas

uCO – Monóxido de carbono não diluído ou livre de ar



## **1. Introdução**

O presente relatório foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação, do mestrado em Engenharia Química - Otimização Energética na Indústria Química.

Este tema foi proposto pela empresa Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A. (C-ITA) ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), devido à necessidade de otimização energética à secção das malhas.

### **1.1. Organização do relatório**

Este relatório é composto por 5 capítulos.

O 1º capítulo é introdutório, abordando a história da empresa onde o estágio decorreu e um enquadramento do tema proposto.

No capítulo 2 é abordada a área das malhas da C-ITA e descrita a máquina estudada – a râmula.

No capítulo 3 encontra-se o levantamento energético efetuado a esta área, com o cálculo dos consumos específicos para cada artigo produzido e a distribuição de utilidades consumidas em cada fase de produção.

No 4º capítulo são apresentadas as várias soluções de otimização energética estudadas e, através de uma análise económica, evidenciado o seu potencial de poupança.

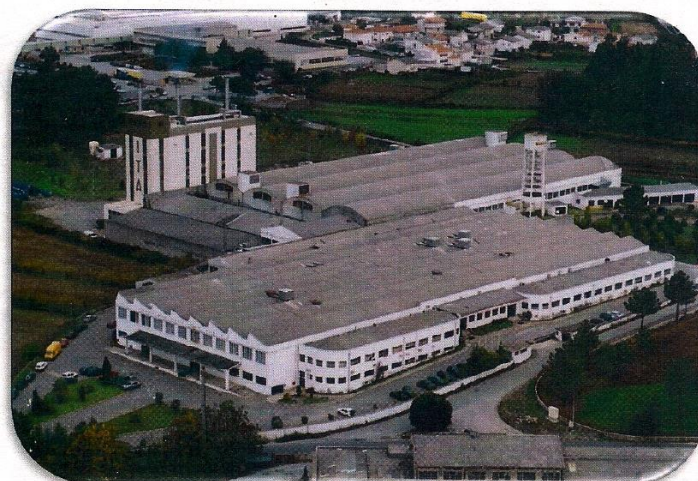
Por fim, no capítulo 5 é feita uma análise conclusiva ao trabalho desenvolvido.

### **1.2. Apresentação da empresa**

A C-ITA, representada na figura 1.1, foi fundada oficialmente a 16 de Dezembro de 1948 no cartório notarial de Santo Tirso. Iniciou a sua atividade a 4 de Agosto de 1950, com a entrada em funcionamento do primeiro torcedor de fio, e a 20 de Agosto desse ano entregou à Manufatura Nacional de Borracha, Mabor, as primeiras amostras de

cordas para pneus. Nesta fase inicial a empresa produzia telas de algodão para fabrico de pneus.

Em 1958 a principal matéria-prima na construção de pneus deixou de ser o algodão e passou a ser utilizado o rayon de alta tenacidade, o que impôs a primeira grande mudança tecnológica e de processos. Esta mudança implicava um acabamento final nos tecidos de rayon, (*dip and dry*) para garantir a adesão aos compostos de borracha.



**Figura 1.1** - Continental – Indústria Têxtil do Ave S.A. (C-ITA) [1].

Entre 1962 e 1963 foram impostas novas mudanças na matéria-prima, com base em produtos de síntese nomeadamente a poliamida de alta tenacidade (nylon), como base dos tecidos de reforço para a construção de pneus. Novamente a empresa viu-se obrigada a alterar as técnicas de fabrico ao nível da torcedura e tecelagem. Esta mudança decorreu em três fases, sendo a última fase responsável por completar o esquema, Torcedura/Tecelagem/Acabamentos.

Na década de 70/80 levou-se a cabo um ambicioso projeto de inovação tecnológica e aumento da capacidade produtiva da fábrica, que envolveu, entre outras medidas, a renovação da secção de torcedura e instalação de uma segunda máquina de impregnar.

Em 1988, o Banco Borges & Irmão vendeu ao Grupo Amorim a sua participação nesta indústria, passando a partir desse momento a ser designada por Indústria Têxtil do Ave (ITA).

Nos anos seguintes foi desenvolvido um esforço para que a empresa pudesse obter a certificação do Sistema de Gestão da Qualidade e do Sistema de Gestão Ambiental,

sendo em 1993 uma das primeiras empresas têxteis a nível nacional a obter a norma ISO 9002 (Sistemas de qualidade – Modelo para Garantia de Qualidade em Produção e Instalação). Em 1998 tornou-se a segunda empresa portuguesa a ser certificada pela APCER segundo a norma ISO 14001 (Sistemas de Gestão Ambiental – Especificação e Diretrizes para Uso).

Entre a década de 90 e o início do século XXI iniciou-se um novo ciclo de investimento, com vista à modernização das áreas de torcedura, tecelagem e impregnação, que aumentou significativamente a capacidade de produção.

O ano de 2008 representou outro marco histórico para esta empresa, onde se começou a fazer a impregnação de corda (fio torcido).

Em 2012 foi instalada uma nova linha de produção - as malhas. Este projeto resultou da estratégia de duas empresas do Grupo Continental de diferentes divisões: a C-ITA e a Benecke-Kaliko (BK), produtora de materiais de revestimento sintético para interiores de automóveis.

Esta nova linha de produção provocou, por um lado, um aumento da dimensão do Grupo Continental e, por outro lado, permitiu à BK uma maior segurança no fornecimento e um controlo mais efetivo, do ponto de vista tecnológico, de custos e de produção de tecidos. O conceito é inovador, tendo em vista melhorar a uniformidade da qualidade dos tecidos, a eficiência e eficácia do processo.

A partir do ano 2013 a ITA mudou o seu nome para Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A. (C-ITA).

Atualmente a C-ITA, tem uma área total de 52329 m<sup>2</sup> dos quais 30153 m<sup>2</sup> são de área coberta, tem 179 colaboradores permanentes e tem uma produção de 14000 ton/ano de “tecidos” e “corda” para pneus, usando como matérias-primas o rayon, nylon, poliéster e aramida. [1] [2] A área das malhas tem vindo a aumentar a sua produção, podendo este ano ascender às 1830 toneladas.

### **1.3. Enquadramento do trabalho**

Cada vez mais se verifica o aumento dos preços de energia que, aliados à situação económica atual, à ameaça do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e às preocupações ambientais, levam à necessidade de uma racionalização eficiente dos consumos.

Esta problemática mudou a forma como as indústrias encaram a energia, levando-as a querer uma melhor análise dos seus gastos energéticos para desenvolverem e implementarem programas de otimização e gestão energética.

A C-ITA, tendo um consumo anual de energia primária superior a 1000 tep/ano, é considerada como uma consumidora intensiva de energia (CIE), de acordo com o Decreto-Lei nº 71/2008. Este decreto-lei regula o sistema de gestão dos consumos intensivos de energia (SGCIE) com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos das instalações consumidoras intensivas de energia. Dessa forma, tem a obrigatoriedade de realizar auditorias energéticas com uma periodicidade de 6 anos. [3]

A última auditoria realizada à C-ITA foi a cargo da entidade Auditene, entregue em 2012, referente ao período 2010-2016, da qual resultou a elaboração do Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn). Uma nova auditoria energética será efetuada no ano 2016.

### **1.4. Auditorias Energéticas**

Nos dias de hoje ainda está presente na mente de algumas indústrias que para haver crescimento económico tem, necessariamente, de existir um aumento no consumo de energia. Contudo, é possível crescer economicamente sem aumentar os consumos ou afetar a qualidade da produção, desde que se implemente um bom sistema de gestão de energia.

Seja por imposição legal, redução de custos do processo, questão de imagem ou pressão da opinião pública, a eficiência energética está cada vez mais presente nos assuntos atuais. Assim, as auditorias energéticas começam a ter cada vez mais uma particular importância para as indústrias.

Uma auditoria energética é um “exame detalhado das condições de utilização de energia na instalação”, que fornece informações específicas e identifica as possibilidades reais de economias de energia. A auditoria energética tem, por isso, como objetivos: [4]

- Quantificar os consumos e custos por forma de energia;
- Examinar o modo como a energia é utilizada na instalação;
- Relacionar o consumo de energia com a produção, determinando um indicador energético de grande relevância – o consumo específico;
- Determinar os consumos de energia por setor, processo ou equipamento;
- Examinar detalhadamente o modo como a energia é utilizada;
- Identificar situações de desperdício de energia;
- Propor medidas corretivas e analisar técnica e economicamente as soluções encontradas.

#### **1.5. Objetivos do trabalho**

O presente trabalho tem como objetivo a otimização energética da secção das malhas da C-ITA. Para ser possível atingir este objetivo foi necessário:

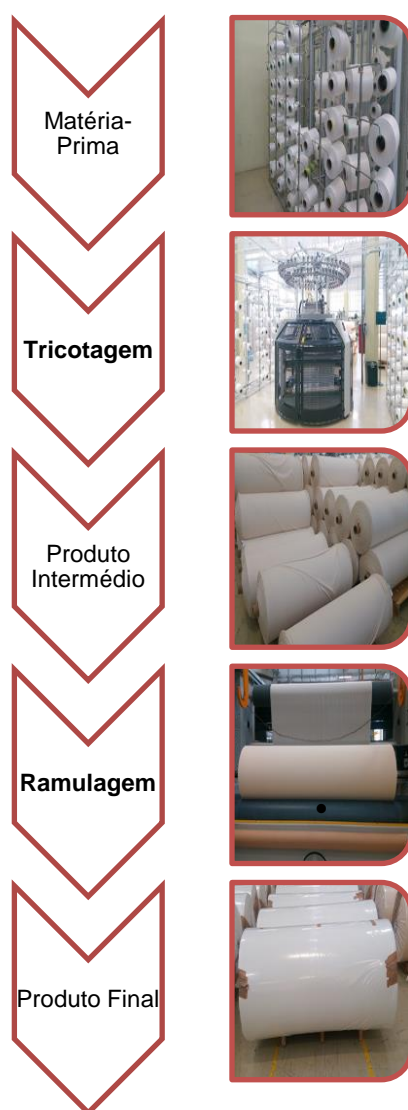
- Avaliar os artigos produzidos e o seu impacto em termos energéticos;
- Analisar o funcionamento das estufas relativamente ao consumo de gás natural;
- Analisar o aproveitamento energético para pré aquecimento do ar, já implementado pela empresa;
- Avaliar as exaustões no consumo energético de gás natural;
- Fazer propostas para poupança energética.



## 2. Área das malhas

O processo de produção das malhas é composto por duas etapas: a tricotagem e a ramulagem.

A matéria-prima utilizada – poliéster ou algodão – é numa primeira instância tricotada em teares circulares, gerando um produto intermédio. Este passa para a fase seguinte, a ramulagem, onde através de diferentes tensões aplicadas a temperaturas elevadas é termofixado, o que lhe confere estabilidade dimensional de acordo com as especificações e exigências do cliente. Na figura 2.1 está representado um esquema deste processo:



**Figura 2.1** - Esquema do processo produtivo das malhas

## 2.1. Tricotagem

A tricotagem é, a seguir à tecelagem, um dos processos têxteis mais utilizados que transforma fio em tecido/malha, conferindo várias propriedades como resistência ao encolhimento e capacidade de alongamento. [5]

Um tecido pode ser tricotado com um único fio pela interligação de “laços” feitos por agulhas em gancho. À medida que os laços são interligados no tecido tricotado, este pode esticar em qualquer direção, mesmo quando é usado um fio com baixa elasticidade. [6]

Nesta técnica os tecidos/malhas são classificados em duas categorias gerais:

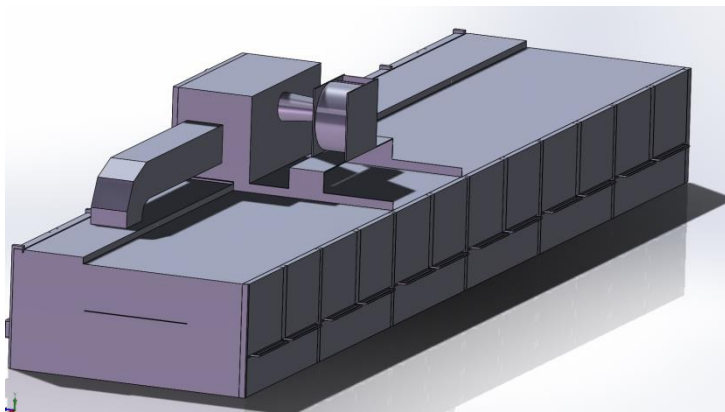
- Tecido tricotado em tecnologia de teia – a alimentação do fio às agulhas é efetuada na vertical
- Tecido tricotado em tecnologia de trama – a alimentação do fio às agulhas é efetuada na horizontal [6]

No processo tradicional de tricotagem o semi-acabado é um “tubo” de tecido que passa em seguida por um “abridor” de forma a ficar com o dobro da largura (tecnologia de teia). No caso específico do projeto malhas, os “tricotadores” são teares circulares, que produzem o tecido já “aberto”, permitindo retirar rolos com o dobro do comprimento, resultando num aumento da eficiência (tecnologia de trama). [7]

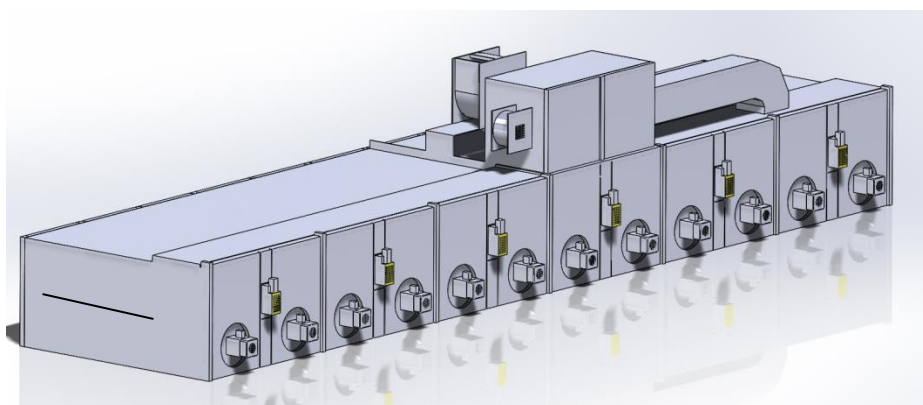
## 2.2. Ramulagem

É um processo de termofixação, sendo o mais importante processo de acabamento para os artigos de poliéster. O equipamento utilizado para este fim é a râmula (figuras 2.2 e 2.3) que permite obter a largura e comprimento de malha pretendido pelo cliente. A temperatura de operação é próxima da temperatura de transição vítrea de forma às fibras poderem ser moldadas conforme as condições finais desejadas. O tempo de exposição varia conforme os requisitos pretendidos. [8]





**Figura 2.2** – Vista frontal da râmula.



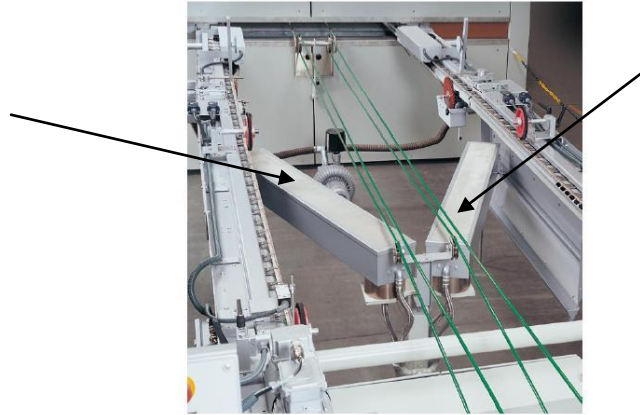
**Figura 2.3** – Vista posterior da râmula.

Para se obter um artigo dimensionalmente estável às lavagens é necessário proceder a uma sobrealimentação à entrada da râmula e a uma regulação da distância entre as cadeias, de forma a controlar a largura e o peso por metro quadrado. [8]

De uma forma geral, uma râmula é composta por:

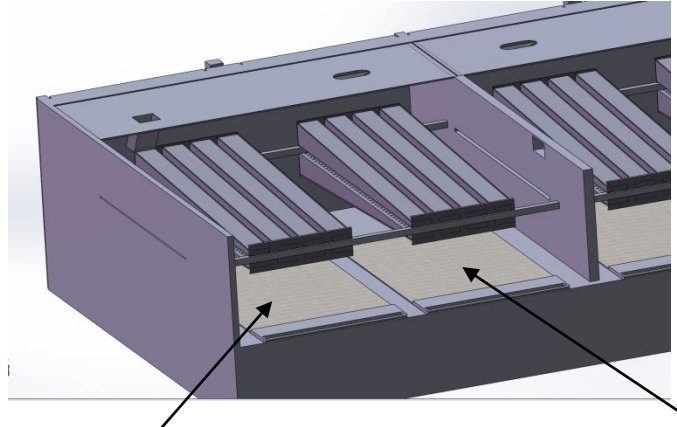
- Regulação da largura à entrada – Através do sinal emitido pelos foto-sensores de exploração de ourelas (extremidades laterais da malha), é efetuada a regulação da largura à entrada, que se mantém ao longo de toda a máquina, por intermédio de duas engrenagens de cremalheira acionadas por motores elétricos;
- Sistema de agulhas – Permitem que o tecido ao encolher no processo fique seguro pelas ourelas, não havendo o risco de se soltar;
- Dispositivo de cola das ourelas – O reforço das ourelas é alcançado através deste dispositivo. Um rolo impressor de imersão transporta a cola à face inferior da orela da malha, onde um rolo compressor situado em cima da orela a carrega contra o rolo impressor;

- Vaporizador de V – Humedece o tecido antes de o mesmo ser puxado para dentro das estufas (figura 2.4)



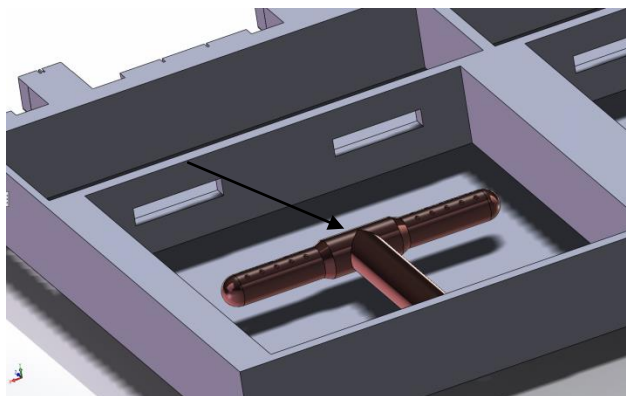
**Figura 2.4** - Vaporizador de V.

- Estufas – Câmaras onde se efetua o tratamento de termofixação. O número de campos de tratamento depende do comprimento da râmula, da velocidade e do efeito que se pretende;
- Tubeiras – Evitam que a penugem e os fios transportados pelo tecido entrem no circuito do ar de circulação, estando instaladas no canal de aspiração; (figura 2.5)

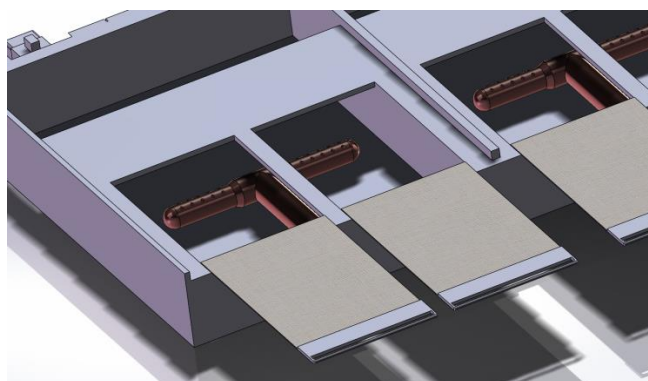


**Figura 2.5** – Esquema representativo das tubeiras no interior da estufa.

- Abas de passagem secundária – Através destas abas o ar recirculado pode ser desviado parcial ou completamente à volta das caixas de tubeira. O ajuste é efetuado pneumaticamente;
- Queimadores – Fazem a combustão do gás natural para aquecer o ar no interior das estufas até à temperatura pretendida (figuras 2.6 e 2.7);

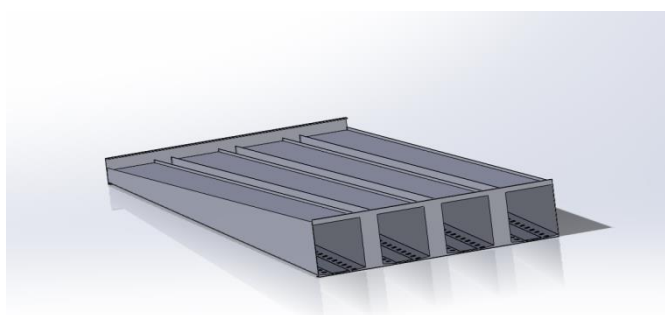


**Figura 2.6** – Esquema representativo do queimador de uma estufa.

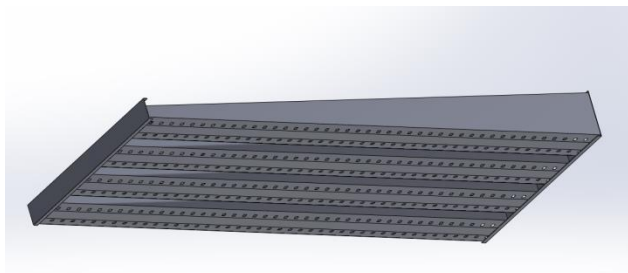


**Figura 2.7** – Esquema representativo da posição do queimador com as tubeiras no interior da estufa.

- Injetores – Estão instalados no interior de cada estufa, sendo através destes que o ar circulante quente é admitido como ar superior e inferior em direção à malha, ficando esta “sustentada” na corrente de ar (figuras 2.8 e 2.9);

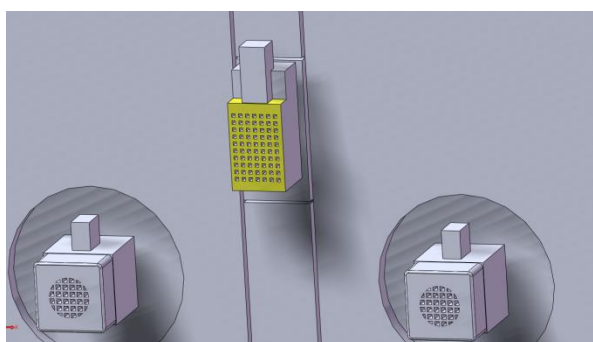


**Figura 2.8** – Esquema de um injetor.



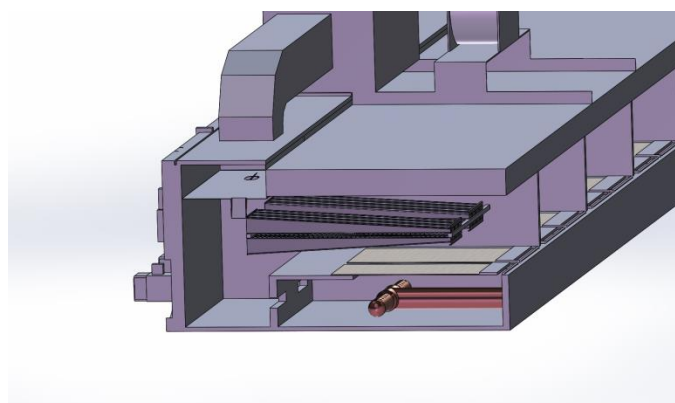
**Figura 2.9** – Vista inferior de um injetor.

- Unidade de ventiladores – Cada estufa tem dois ventiladores que aspiram o ar quente interno gerado pelos queimadores e o transportam para o sistema de injetores instalados (figura 2.10)



**Figura 2.10** – Esquema da unidade de ventiladores das estufas.

Na figura 2.11 está representado um corte transversal da râmula, para se ter uma melhor percepção do seu arranjo interno:



**Figura 2.11** – Corte transversal da râmula.

### 2.2.1. Descrição da râmula da C-ITA

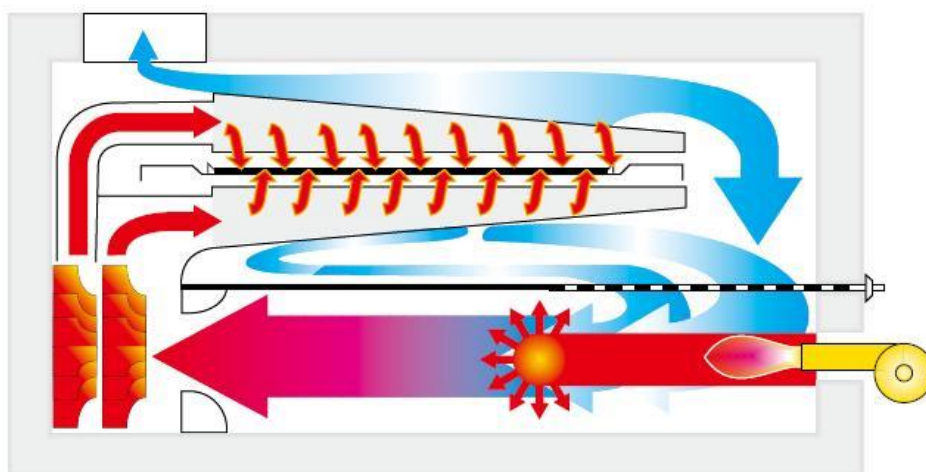
A râmula instalada na C-ITA está equipada com 6 estufas (campos), cada uma com um queimador e dois ventiladores que fazem a circulação do ar quente. Tem um sistema tubular interno, por onde se faz a exaustão e insuflação do ar.

Foi também instalado um sistema de recuperação de calor, que aproveita os gases quentes da exaustão para aquecer o ar fresco que está a entrar nas estufas.

#### ⇒ Sistema de aquecimento das estufas

O ar quente proveniente da queima do gás natural é encaminhado para uma câmara-de-ar, onde os ventiladores o fazem circular como ar quente superior e inferior para a malha, através do sistema de injetores. Uma parte do ar superior é conduzido através de um sistema tubular interno para o ventilador de exaustão, o restante, juntamente com o ar quente inferior, é introduzido novamente na câmara-de-ar. [9]

A figura 2.12 representa um esquema deste sistema de aquecimento.

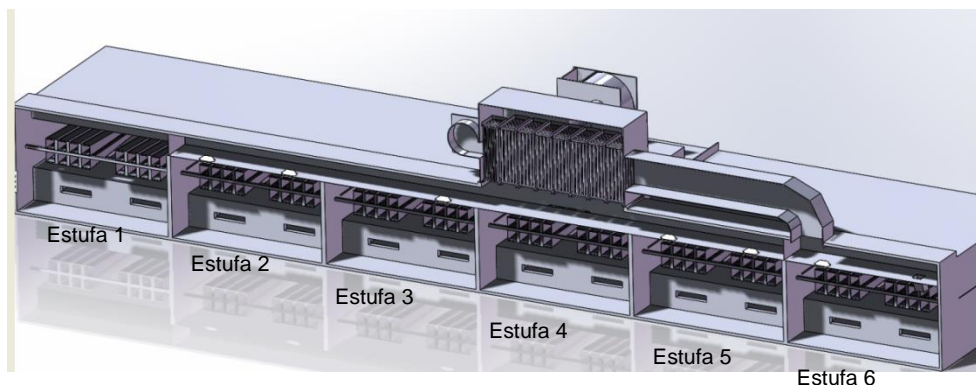


**Figura 2.12** - Sistema de aquecimento da Râmula – queimador [10]

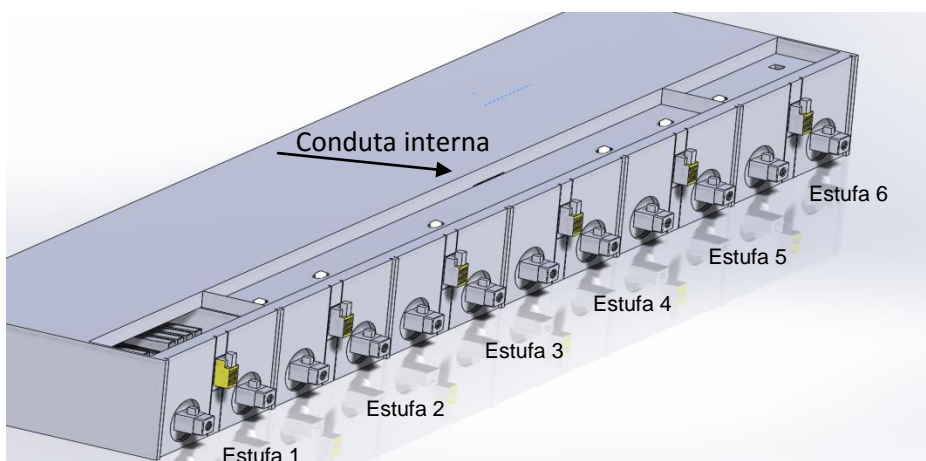
Cada campo da câmara de tratamento tem um sistema de extinção de incêndios por *sprinklers* (aspersores), que são ativados individualmente quando a área onde estão colocados atinge uma temperatura pré-definida. Estes contêm uma ampola com um líquido de alto coeficiente de expansão, que rebenta quando a temperatura máxima de operação do *sprinkler* é atingida.

⇒ Sistema tubular interno

O sistema tubular interno está localizado entre as estufas 2 e 6, dividindo-se em duas partes. Nas figuras 2.13 e 2.14 estão representados cortes transversais à râmula para visualização do sistema tubular interno.



**Figura 2.13** – Corte transversal da râmula para visualização do sistema tubular interno.



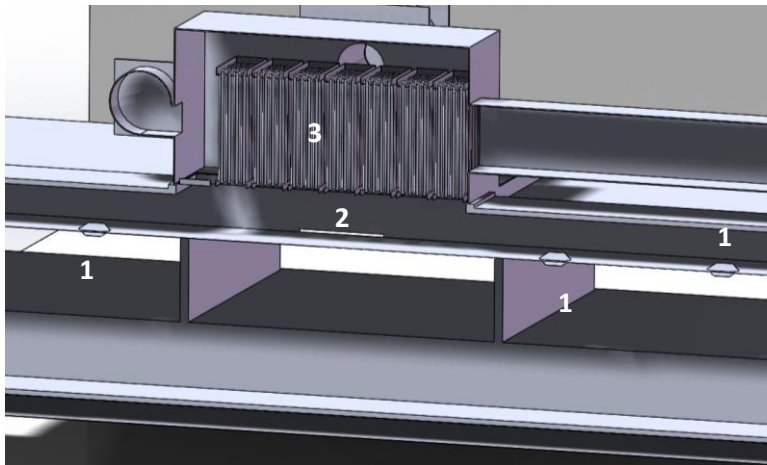
**Figura 2.14** – Corte de cima da râmula para visualização da conduta interna.

- Sistema de exaustão – O ventilador de exaustão aspira o ar quente “sujo” das estufas, pela conduta interna entre os campos 2 e 5, onde estão instalados registros mecânicos que, por ajuste manual, regulam a quantidade de gases quentes que saem de cada estufa, sendo que a posição zero corresponde ao registro fechado e a posição 6 ao registro aberto. No entanto, a saída de ar nunca se encontra completamente fechada porque a sua geometria é circular e o registro é facetado, ficando sempre uma abertura de cada lado. As estufas 2 e 5 possuem dois registros mecânicos que permitem a exaustão da própria estufa e da 1 e 6, respetivamente. A estufa 3 possui um registro mecânico próprio e, pela estufa 4, é feita a ligação a um permutador de calor, pelo que esta não



possui nenhum registro mas sim uma fina abertura entre a estufa e a conduta, permitindo a exaustão dos gases.

Na figura 2.15 está representado um esquema desta zona da conduta.



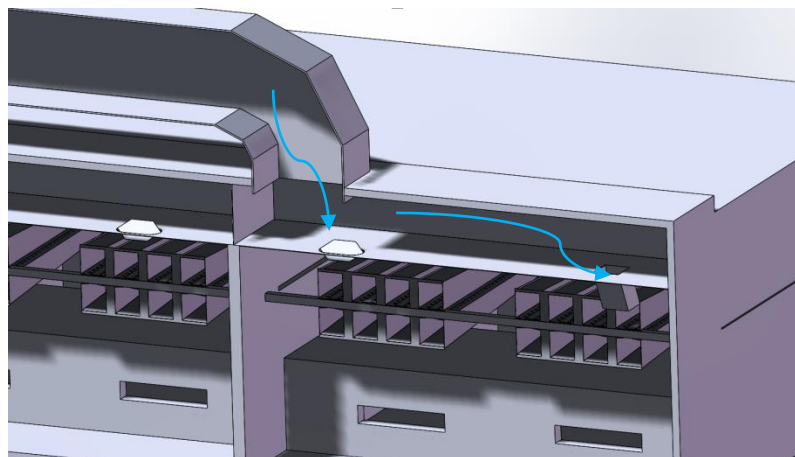
**Figura 2.15** – Esquema representativo dos registros mecânicos.

Legenda:

- 1- Registros mecânicos
- 2- Abertura da estufa 4
- 3- Permutador de calor

- Sistema de insuflação – O permutador de calor de tubos instalado é um sistema de recuperação de calor, onde os gases de exaustão aquecem ar ambiente fresco, que é aí introduzido por um ventilador. Este ar fresco é encaminhado para a conduta interna da estufa 6 onde uma parte, através do registro mecânico, passa para o interior da estufa misturando-se com o restante ar quente. O restante é encaminhado pela conduta proveniente do permutador até ao injetor.

Na figura 2.16 pode-se observar um esquema da conduta interna da estufa 6.



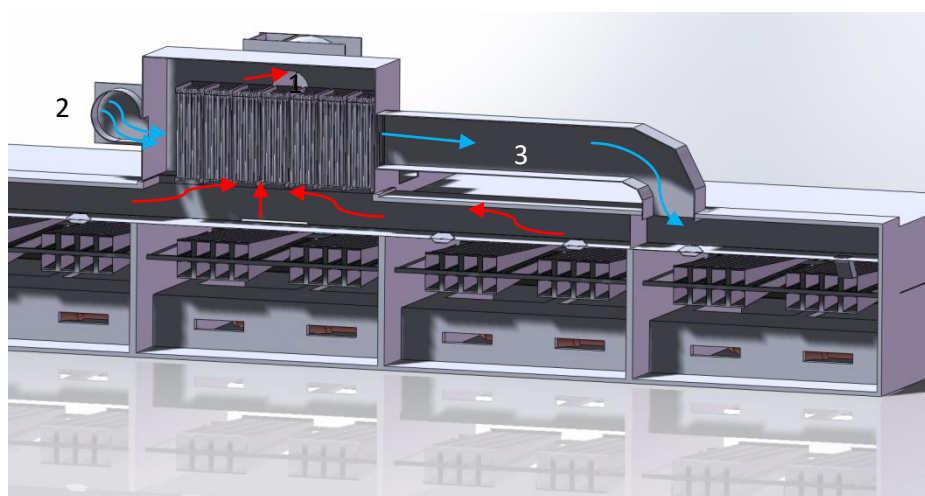
**Figura 2.16** – Esquema representativo da condução de insuflação.

⇒ Sistema de recuperação de calor

O permutador de calor instalado nesta secção da C-ITA é de fluxo cruzado, com um fluido misturado e outro não misturado. Tem como objetivo a recuperação de calor e é caracterizado da seguinte forma:

- Quanto ao processo de transferência de calor é de contacto indireto, pois os fluidos quente e frio estão separados por uma superfície;
- Quanto ao tipo de construção é um permutador de tubos, onde o fluido quente circula no seu interior e o frio no exterior;
- Quanto à disposição das correntes é de correntes cruzadas, pois os fluidos escoam perpendicularmente um em relação ao outro. [11]

Na figura 2.17 está esquematizado o processo de recuperação de calor.



**Figura 2.17** – Esquema representativo do processo de recuperação de calor.

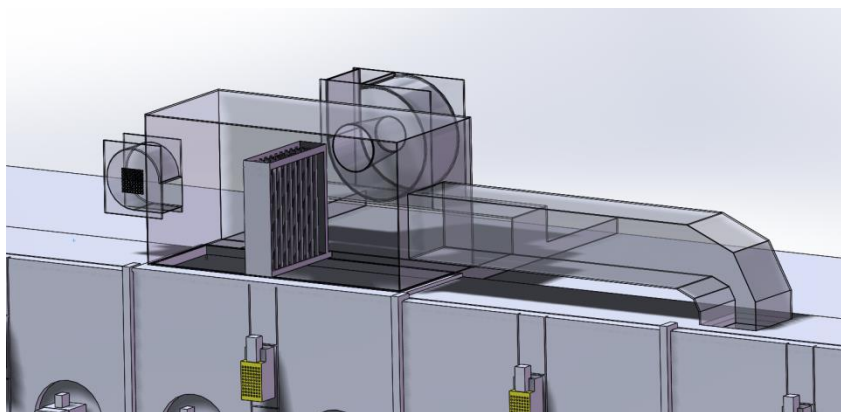


Legenda:

- 1- Ventilador de exaustão
- 2- Ventilador de insuflação
- 3- Conduto de insuflação

O ventilador de exaustão tem uma ligação ao permutador de calor, fazendo com que o ar quente de exaustão passe pelo interior dos tubos do permutador aquecendo o ar fresco que está a passar pelo exterior. Este ar fresco é enviado para o permutador por um ventilador que extrai ar ambiente, entrando, depois de aquecido, para a conduta de insuflação.

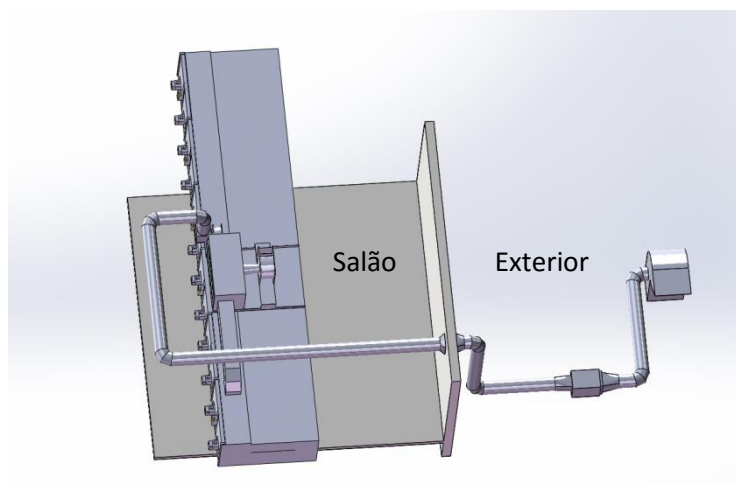
Na figura 2.18 está representada a estrutura do sistema de recuperação de calor, com apenas 1 módulo do permutador visível, para uma melhor percepção.



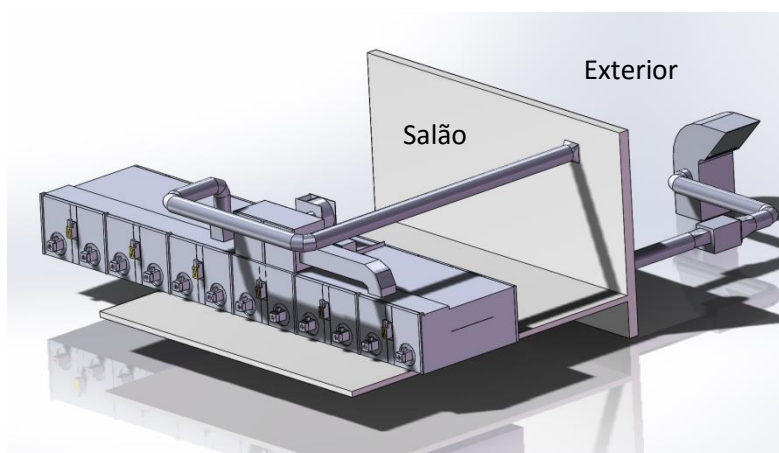
**Figura 2.18** – Esquema representativo da estrutura interna do sistema de recuperação de calor.

### 2.3. Projeto de aproveitamento de ar quente

Posteriormente à instalação da râmula foi projetado um sistema de ventilação apropriado para o aproveitamento do caudal de ar quente da exaustão da sala dos compressores. Este ar é dividido para aquecimento ambiente dos balneários e para pré-aquecer o ar fresco de entrada do recuperador de calor da râmula. Nas figura 2.19 e 2.20 está esquematizada a ligação da conduta para pré-aquecer o ar de entrada do permutador.



**Figura 2.19** – Vista de cima da ligação da conduta de aproveitamento de ar quente.

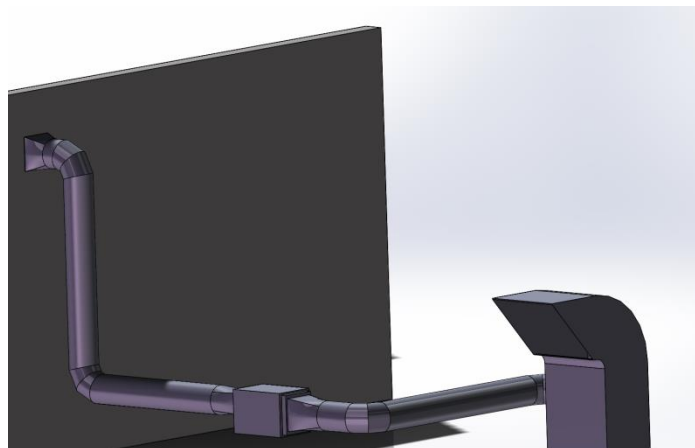


**Figura 2.20** - Vista lateral da ligação da conduta de aproveitamento de ar quente.

As condutas instaladas são fabricadas em chapa de aço galvanizada, sem nenhum revestimento ou isolamento.

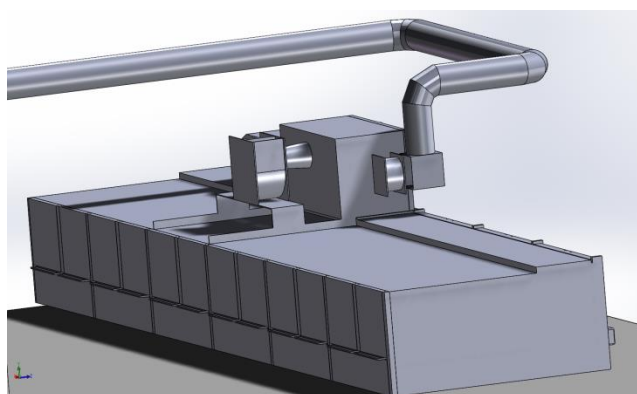
A conduta principal de exaustão tem duas picagens, cada uma interligada a um ventilador que aspira o caudal necessário para fornecer cada zona. Entre as picagens da conduta de exaustão e os ventiladores, existem registos motorizados que, em caso de avaria dos ventiladores, deverão fechar de forma a evitar a entrada de ar na rede.

Na figura 2.21 está representada a conduta exterior de ligação à râmula.

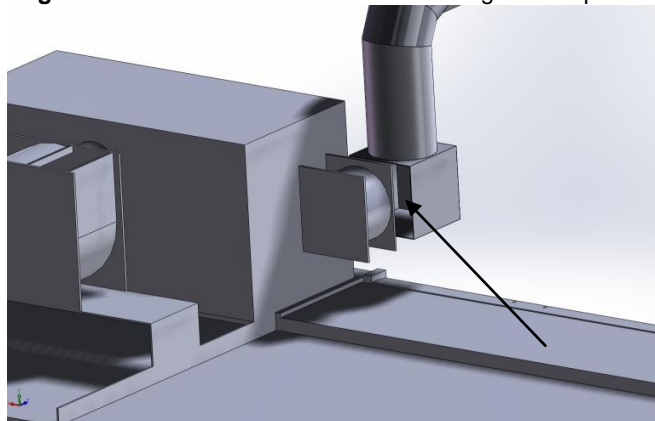


**Figura 2.21** – Esquema representativo da conduta exterior de ligação à râmula.

Na conduta direcionada para a râmula, a zona de entrega do ar quente é um pleno com abertura lateral voltada para a admissão do ventilador do permutador de calor. Está colocado a uma distância que permita a aspiração natural pelo ventilador, saindo pelas laterais o caudal excedentário. Nas figuras 2.22 e 2.23 pode-se observar um esquema desta instalação.



**Figura 2.22** – Vista lateral da zona de entrega de ar quente.



**Figura 2.23** – Esquema representativo da zona de entrega de ar quente.



### 3. Avaliação Energética à Área das Malhas

Para ser possível fazer uma correta avaliação energética foi necessário, em primeiro lugar, estudar as condições de operação da râmula.

Numa fase inicial, esta secção trabalhava apenas em 2 turnos diários (6h00 – 14h00 / 14h00-22h00), tendo um arranque todas as manhãs, com paragens de 30 min em cada turno para o horário de refeição. Atualmente o funcionamento é de três turnos diários em trabalho contínuo.

Foi verificado que a conduta dimensionada para o aproveitamento de ar quente proveniente dos compressores tinha o registo fechado, pelo que não estava a ser enviado o ar quente disponível.

Apesar de se terem efetuado leituras exaustivas dos consumos energéticos da râmula, neste capítulo apenas são apresentados os consumos relativos ao funcionamento atual da máquina, ou seja três turnos diários em trabalho contínuo, com o registo da conduta totalmente aberto.

Assim, numa primeira análise constatou-se que:

- Os teares necessitam de ar comprimido em duas fases:
  - Para facilitar o enfiamento dos “fios” nas tubeiras da máquina (processo não contínuo);
  - Para a lubrificação das agulhas, sendo o óleo pulverizado para as agulhas de forma a diminuir o desgaste das mesmas (processo contínuo).
- A nível de ar comprimido os teares já se encontram otimizados na quantidade a pulverizar com o óleo;
- Em todos os artigos, as estufas têm 60% de ventilação inferior e 40% de ventilação superior;
- Aquando do fim da produção de cada rolo de malha a râmula é parada, a ventilação diminui automaticamente para o seu valor mínimo, o rolo é retirado e inicia-se um novo rolo de produção;
- A percentagem de exaustão, especificada na ficha técnica de cada artigo, varia entre os 30% e os 40%, sendo os 30% utilizada em artigos mais leves (100% poliéster) e os 40% nos artigos mais pesados (poliéster com algodão). O sistema de controlo instalado na râmula (Monformatic) tem como especificação

para valor mínimo de exaustão 30%, não sendo por isso possível admitir uma exaustão menor;

- Os registos mecânicos das várias estufas estão sempre na mesma posição, não tendo sido encontrada uma razão para tal;
- Apenas existe um contador geral de gás natural, tendo por isso que assumir que o consumo de cada estufa é o mesmo;
- O ventilador de insuflação de ar fresco para o permutador de calor está sempre a 30% da sua capacidade máxima.

Relativamente aos artigos produzidos verificou-se que estes diferem entre si, não só em termos de constituição têxtil mas também em algumas condições de operação.

Na tabela 3.1 encontram-se as condições de operação, nos teares, para cada artigo produzido.

**Tabela 3.1** - Condições de operação nos teares estabelecidas para cada artigo

Artigo	Tear	Altura (cm/volta)	Nº total de voltas	Velocidade (voltas/min)	Largura (m)	Metros de rolo	Peso específico (g/m <sup>2</sup> )
<b>A</b>	KLT2-01	11	6700	34	1,73	737,0	55
	KLT2-02	11	6700	32	1,73	737,0	55
<b>B</b>	KLT4-01	6,8	7350	32	1,64	499,8	95
	KLT4-02	6,8	7350	32	1,64	499,8	95
<b>C</b>	KLT3-01	6,4	7800	32	1,74	499,2	95
	KLT3-02	6,6	7702	32	1,74	508,3	95
	KLT3-03	6,6	7702	32	1,74	508,3	95
	KLT3-04	6,6	7702	32	1,74	508,3	95
<b>D</b>	KLT1-01	7	5760	32	1,64	403,2	140
	KLT1-02	7	5760	32	1,64	403,2	140
	KLT1-03	7	5760	32	1,64	403,2	140
<b>E</b>	KLT5-01	8	5200	32	1,74	416,0	140
	KLT5-02	8	5200	32	1,74	416,0	140

Analisando a tabela 3.1, verifica-se que os artigos A, B e C têm um peso específico mais baixo e os artigos D e E são os de peso específico superior. Isto acontece porque os artigos A, B e C apenas são constituídos por poliéster, enquanto que os artigos D e E são constituídos por poliéster e algodão.

Na tabela 3.2 encontram-se descritas as condições de operação, na râmula, para cada artigo produzido.

**Tabela 3.2** - Condições de operação na râmula estabelecidas para cada artigo

Artigo	Peso específico (g/m <sup>2</sup> )	Largura (m)	Velocidade de produção (m/min)	Ventilação de exaustão (%)	Ventilação de insuflação (%)	Temperatura de operação (°C)
A	55	1,73	40	30	30	190
B	95	1,64	40	40	30	190
C	95	1,74	40	40	30	190
D	140	1,64	40	40	30	205
E	140	1,74	40	40	30	205

A râmula opera com o sistema de registos mecânicos instalados nas estufas sempre nas mesmas condições (tabela 3.3):

**Tabela 3.3** - Sistema de abertura dos registos mecânicos para cada estufa

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6
A	3	3	3	2	3	3
B	3	3	3	2	3	3
C	3	3	3	2	3	3
D	3	3	3	2	3	3
E	3	3	3	2	3	3

### 3.1. Levantamento Energético

Os valores apresentados neste capítulo são valores lidos em diversos ensaios efetuados às várias utilidades consumidas, durante um determinado período de tempo.

O consumo de ar comprimido nos teares e na râmula foi obtido por leitura nos caudalímetros instalados (figura 3.1).

O valor de eletricidade foi obtido de duas formas distintas:

- Na râmula, por leituras ao contador de energia instalado (figura 3.2);
- Nos teares, uma vez que não possuem nenhum contador de energia individual, foi necessário ligar um analisador de energia portátil a cada um (figura 3.3).



**Figura 3.1** – Caudalímetro instalado.

O consumo de ar comprimido era obtido em litros, sendo necessária a sua conversão para kWh utilizando um fator de conversão ( $\text{kWh/m}^3$ ). Este fator é o resultado do quociente entre a energia consumida pelos compressores e o volume de ar comprimido produzido pelos mesmos, em condições FAD (1 atm e 20°C), e o seu valor pode ser consultado no anexo A.



**Figura 3.2** – Leitor de energia para a râmula.





**Figura 3.3** – Analisador de energia portátil.

Na râmula, o valor de gás natural consumido para o aquecimento das estufas foi lido no contador instalado (figura 3.4). O gás natural necessário para a produção de vapor na caldeira, para as malhas de algodão, foi lido no contador instalado no local (figura 3.5)



**Figura 3.4** – Contador de gás natural da râmula.

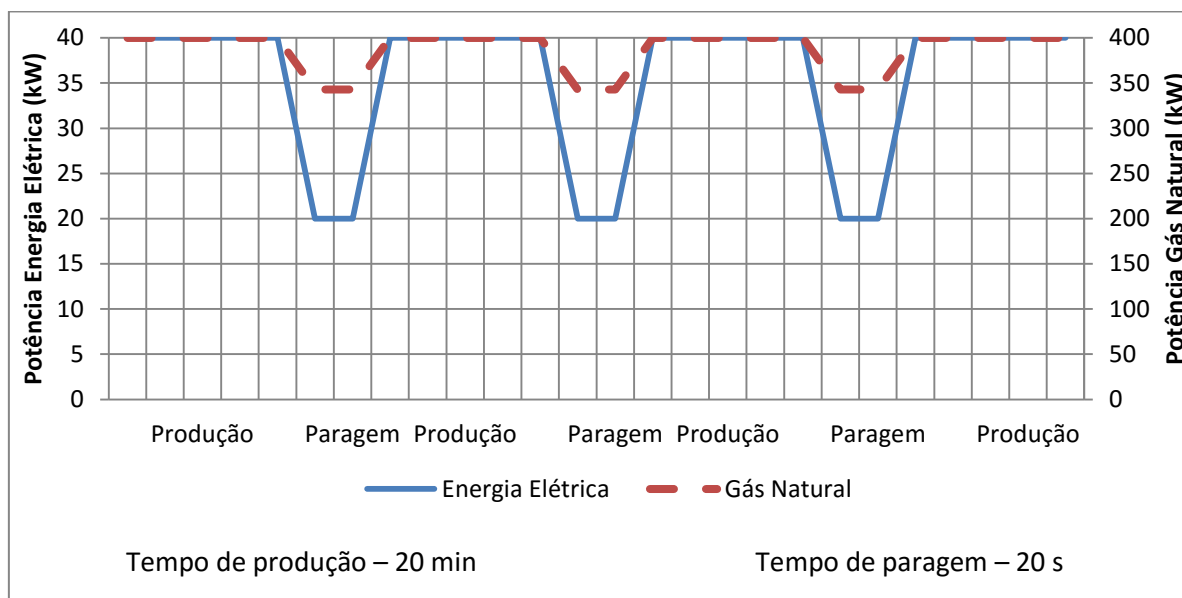


**Figura 3.5** - Contador de gás natural da caldeira.

Para o gás natural foi necessário multiplicar o valor obtido em  $\text{m}^3$  por um fator de correção, fornecido pela empresa, e também pelo poder calorífico superior, de forma a ser convertido para kWh. Este fator é obtido pelo quociente entre o volume corrigido e o volume bruto lidos no contador de gás natural, fazendo a correção do consumo de acordo com a pressão e temperatura. Estes valores podem ser consultados no anexo A.

Para todas as utilidades, a potência foi calculada através do quociente entre o valor de energia obtido e o tempo de ensaio.

Numa primeira fase efetuou-se uma análise ao comportamento energético da râmula, durante o período de produção (20 min) e paragem (20s) para troca de rolo, tendo-se obtido os valores apresentados na figura 3.6.



**Figura 3.6** – Comportamento energético da râmula durante a fase produção/paragem.

Verifica-se que sempre que ocorre a troca de rolo (paragens), a máquina diminui a sua potência energética.

A nível de energia elétrica, essa diminuição ocorre para cerca de metade do seu valor em funcionamento. Uma das causas é o facto de a ventilação interna diminuir, automaticamente, o seu valor para o mínimo.

Relativamente ao gás natural, a diminuição da potência energética não é tão acentuada pois as estufas têm que manter na mesma a temperatura de operação, com o sistema de exaustão a realizar a extração do ar quente. No entanto, uma vez que a râmula está parada, não está a entrar malha à temperatura ambiente para as estufas, não havendo a necessidade do seu aquecimento, o que leva à diminuição do consumo de gás natural.

Posteriormente foram efetuadas várias leituras aos consumos de cada artigo. Estes valores encontram-se nas tabelas 3.4 e 3.5 e representam uma média da potência consumida por cada um, ao longo dos vários meses de estágio.

**Tabela 3.4** - Potência da energia elétrica e ar comprimido dos artigos na tricotagem

Artigo	Potência Energia Elétrica (kW)	Potência Ar Comprimido (kW)
<b>A</b>	2,12	1,88
<b>B</b>	2,13	0,40
<b>C</b>	2,38	1,11
<b>D</b>	2,78	2,64
<b>E</b>	2,98	2,67

**Tabela 3.5** - Potência consumida pelos artigos na termofixação

Artigo	Potência Energia Elétrica (kW)	Potência Ar Comprimido (kW)	Potência Gás Natural Estufas (kW)	Potência Gás Natural Caldeira (kW)
<b>A</b>	40,0	2,40	337,91	---
<b>B</b>	38,3	2,47	399,29	---
<b>C</b>	39,9	2,50	393,04	---
<b>D</b>	38,8	2,39	441,93	109,54
<b>E</b>	38,8	2,53	445,25	116,00

Os artigos D e E são artigos que, por serem constituídos por poliéster e algodão, necessitam de uma temperatura de operação mais elevada para a termofixação. Isto leva a que tenham um consumo de gás natural superior, na ordem dos 20%, relativamente aos restantes. Também são produzidos utilizando mais uma utilidade – vapor. Este é vaporizado para a malha antes da sua entrada para as estufas, aumentando a humidade do tecido e, conseqüentemente, o consumo de gás natural.

O artigo A, apesar de ser produzido à mesma temperatura de operação que o B e o C, apresenta um consumo de gás natural ligeiramente inferior. Isto prende-se com o facto de neste artigo a ventilação de exaustão estar a 30%, enquanto que para os artigos B e C esse valor está regulado para os 40%.

A nível de energia elétrica e ar comprimido não são notadas diferenças significativas, pois os artigos são produzidos à mesma velocidade e com a mesma ventilação interior, entre outras.

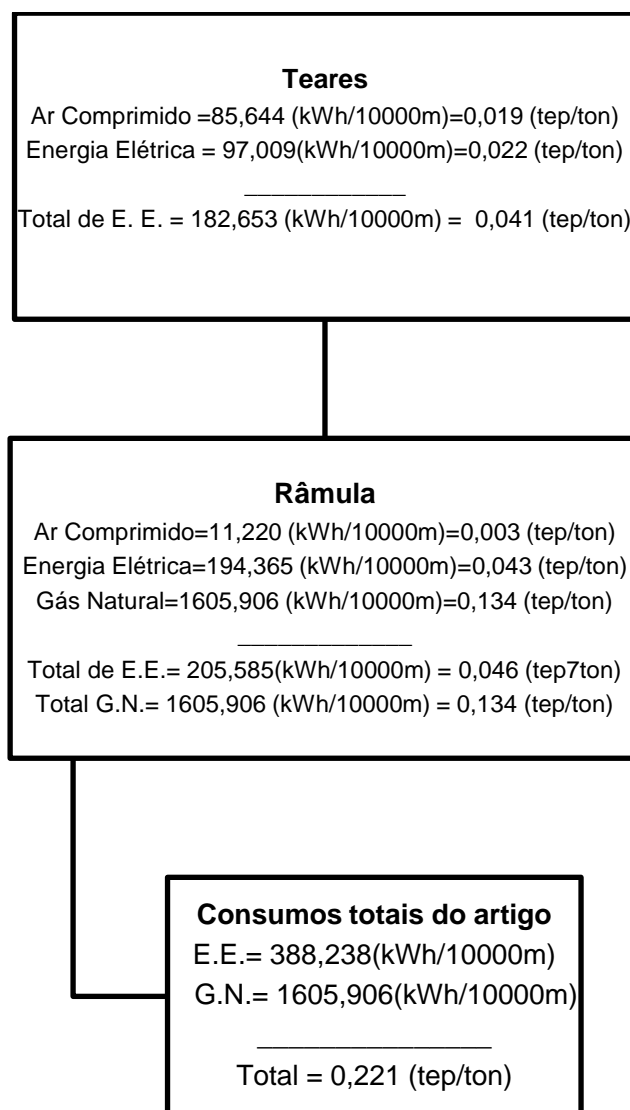
No anexo A podem ser consultados os cálculos para a construção do gráfico da figura 3.6 e das tabelas 3.4 e 3.5.

### 3.2. Consumos Específicos

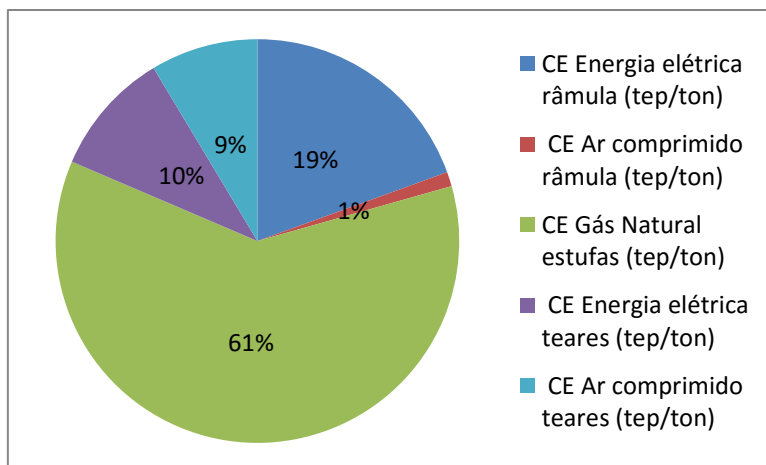
Para se poder quantificar a energia necessária para a produção de cada artigo, em metros lineares, desde a tricotagem até à ramulagem, foram calculados os consumos específicos de cada um. Este valor indica a quantidade de energia necessária para produzir cada quilograma ou metro de artigo.

Nas figuras 3.7 a 3.16 encontram-se os fluxogramas e a distribuição dos consumos totais para os artigos em estudo, expressos em kWh/10.000 m e também em tep/ton para posterior comparação.

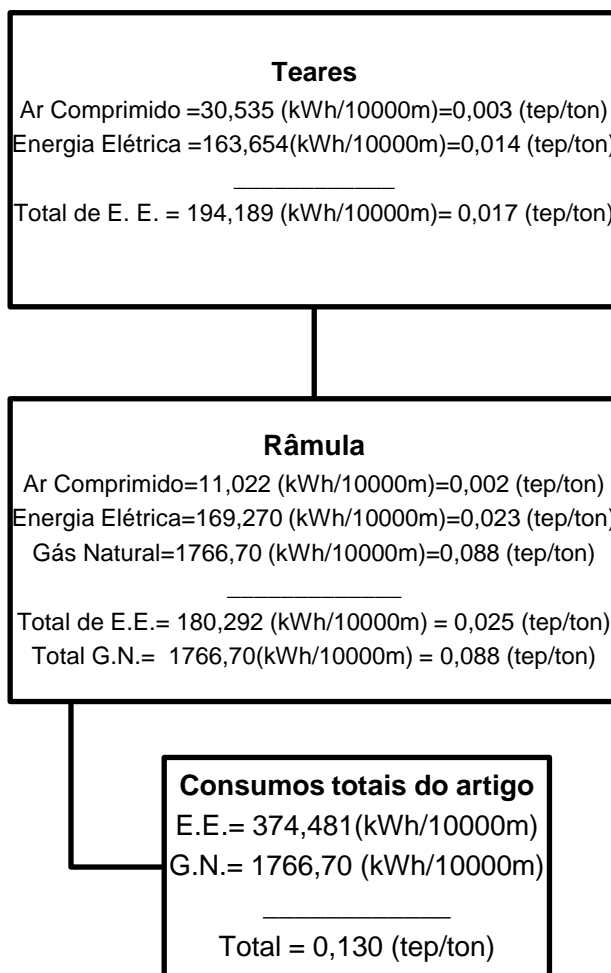
Os cálculos podem ser consultados no anexo B.



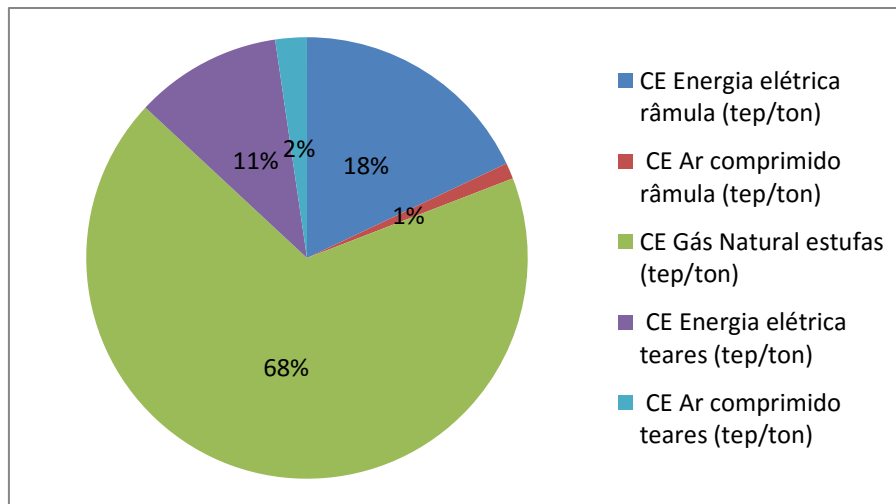
**Figura 3.7** - Fluxograma do consumo total do artigo A.



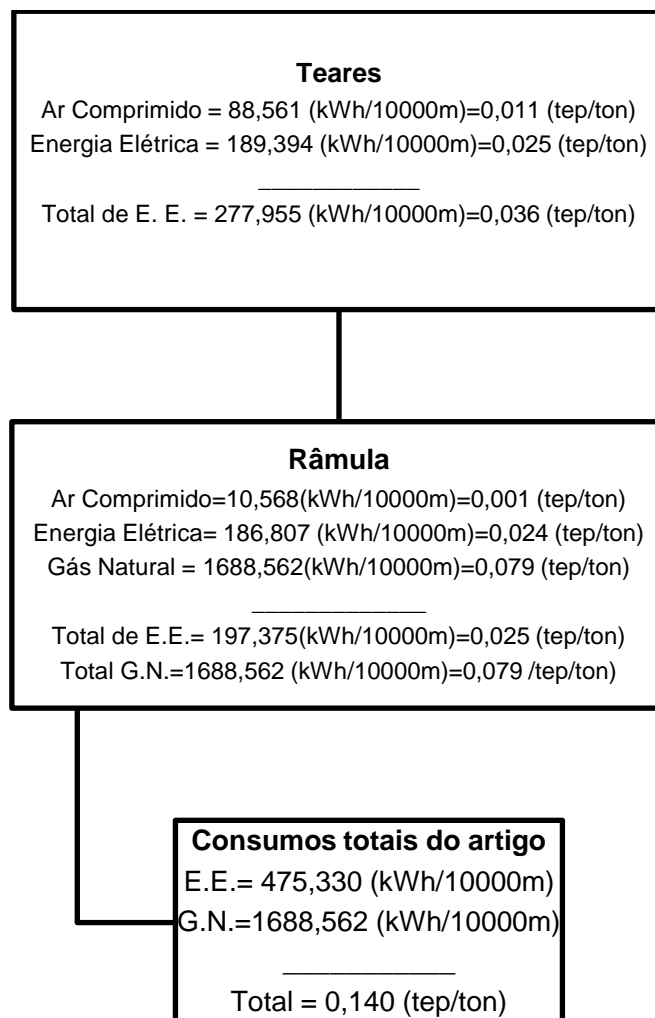
**Figura 3.8** - Distribuição do consumo por processo do artigo A.



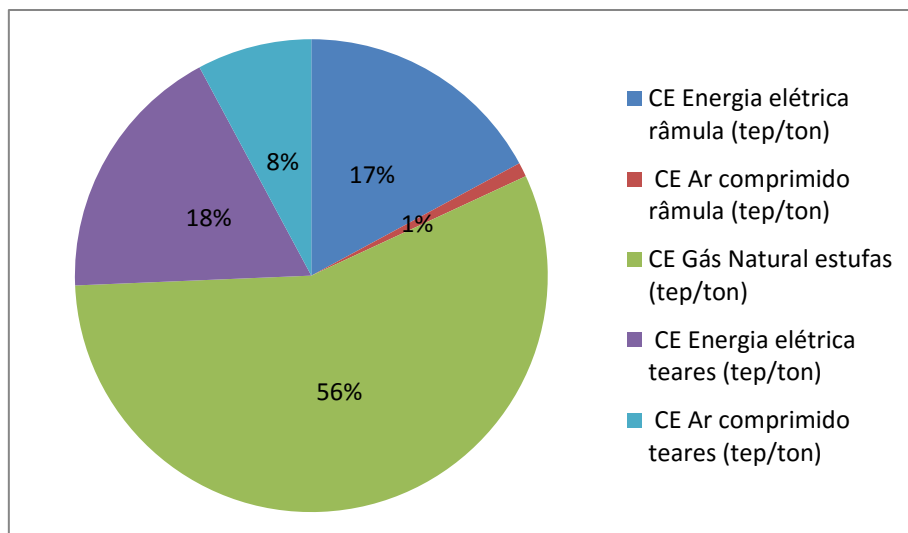
**Figura 3.9** - Fluxograma do consumo total do artigo B.



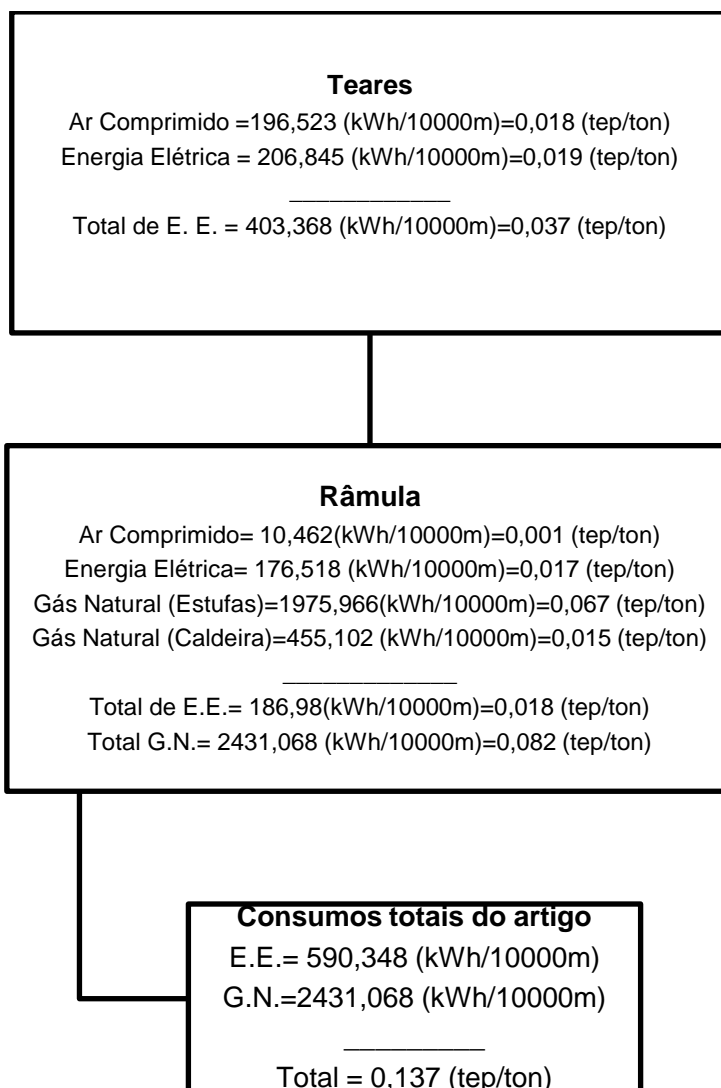
**Figura 3.10** - Distribuição do consumo por processo do artigo B.



**Figura 3.11** - Fluxograma do consumo total do artigo C.



**Figura 3.12** - Distribuição do consumo por processo do artigo C.



**Figura 3.13** - Fluxograma do consumo total do artigo D.

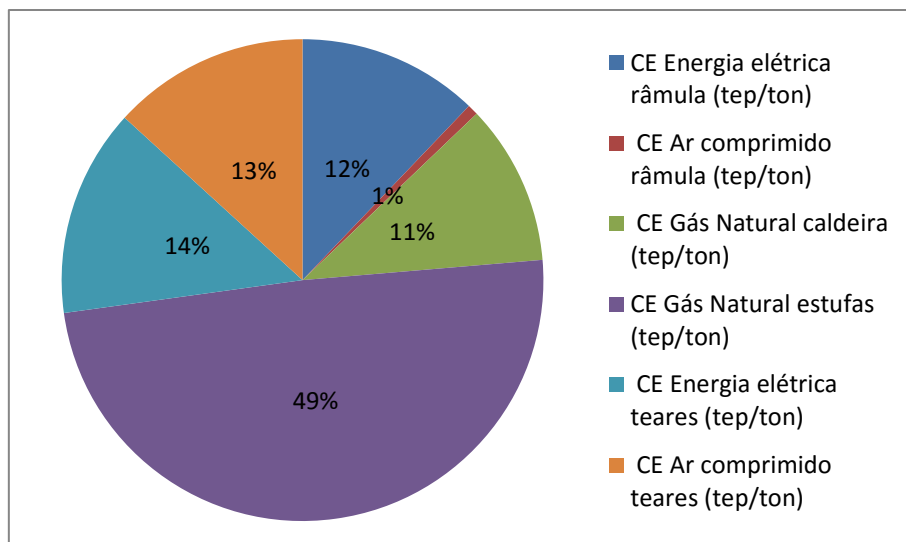


Figura 3.14 - Distribuição do consumo por processo do artigo D.

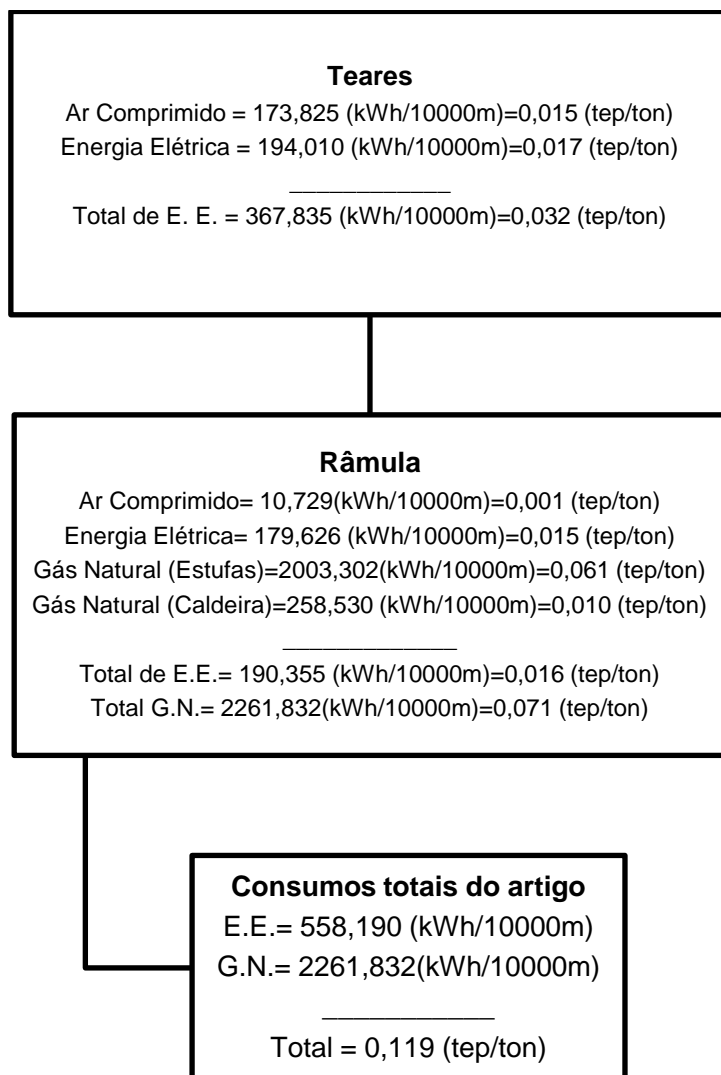
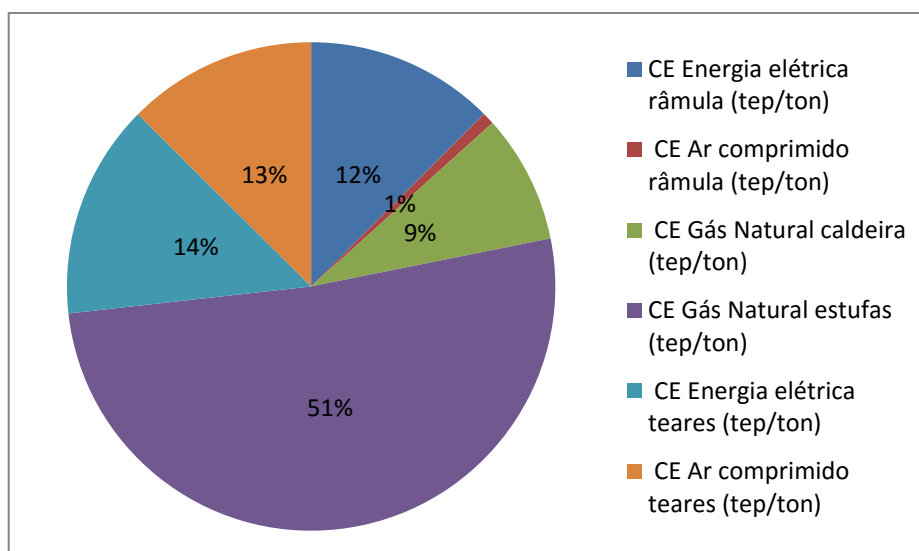


Figura 3.15 - Fluxograma do consumo total do artigo E.





**Figura 3.16** - Distribuição do consumo por processo do artigo E.

Pela análise das figuras 3.7 a 3.16 pode-se verificar que, para todos os artigos, o consumo de gás natural é a principal fonte de energia, representando mais de 50% do consumo energético necessário para a sua produção.

Como seria de esperar, os artigos D e E têm um consumo específico de gás natural, das estufas, por metro linear superior aos restantes. Tal é explicado pelos valores apresentados na tabela 3.2, onde se pode verificar que estes artigos obrigam a uma temperatura de trabalho superior, conduzindo necessariamente a um maior consumo de gás. Por outro lado, se este consumo específico for analisado em tep por tonelada verifica-se o efeito contrário, ou seja os artigos D e E são os que apresentam um CE menor. Isto prende-se com o facto de serem artigos com um peso específico superior aos restantes e quanto maior esta característica menor o consumo específico.

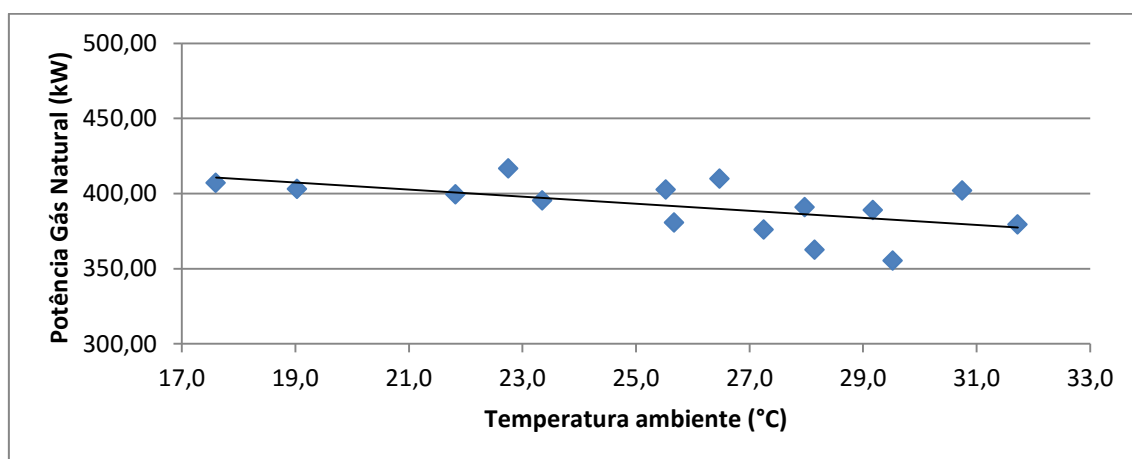
Relativamente aos teares, verificaram-se entre eles diferenças nos consumos energéticos, o que explica as variações nos consumos específicos. Isto será explicado pelo facto de não terem todos as mesmas condições de operação, como já foi evidenciado na tabela 3.1. As possíveis fugas de ar comprimido também estão na base destas diferenças.

### 3.3. Influência da temperatura e humidade

A temperatura e humidade ambiente do salão são variáveis que mudam constantemente, afetadas pela temperatura exterior, pelo calor da própria râmula e pelo calor libertado pelos torcedores instalados no mesmo salão. A sua variação pode influenciar o consumo de gás natural da râmula, pois quanto mais quente estiver o ar do salão, mais quente este entrará nas estufas e menos gás natural se irá consumir.

Para cada ensaio efetuado estas variáveis foram registadas, com o intuito de se avaliar a sua influência no consumo de gás natural.

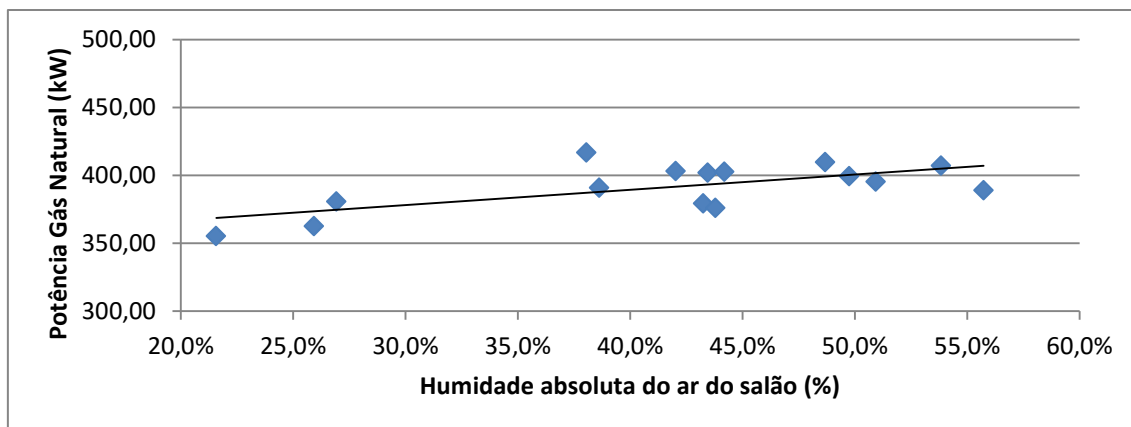
Uma vez que o comportamento para todos os artigos foi semelhante, apresenta-se nas figuras 3.17 a 3.19 o consumo de gás natural com o aumento da temperatura e humidade, para um dos artigos. Os valores experimentais utilizados para a sua construção podem ser consultados no anexo C.



**Figura 3.17** – Variação do consumo de gás natural com o aumento da temperatura ambiente, para o artigo C.

Pela análise da figura 3.17 verifica-se que o consumo de gás natural tem tendência a diminuir com o aumento da temperatura ambiente, tal como seria de esperar.

A humidade do ar ambiente do salão também foi tida em conta ao longo dos vários ensaios, estando a sua análise gráfica representada na figura 3.18.

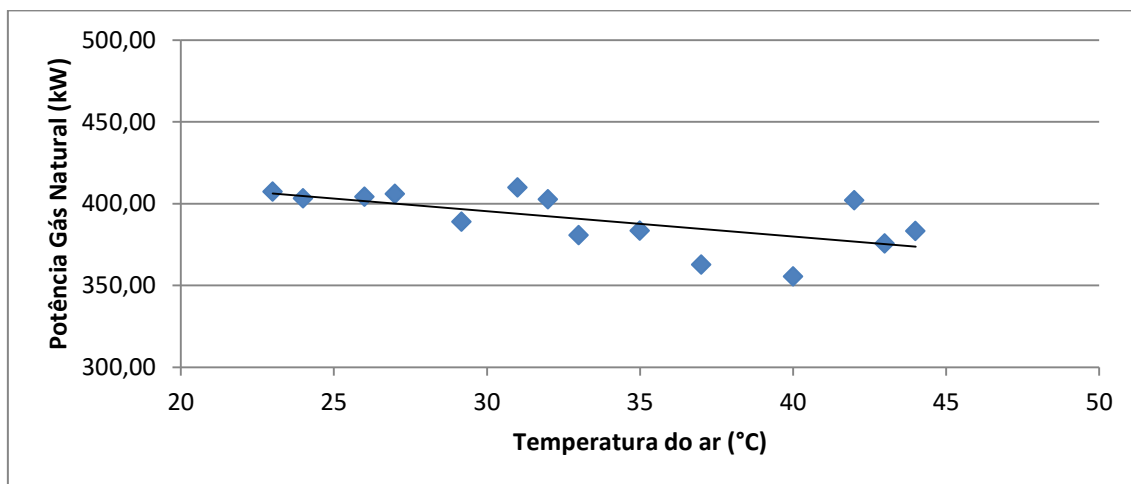


**Figura 3.18** - Variação do consumo de gás natural com o aumento da humidade no ar do salão, para o artigo C.

A humidade do ar ambiente tem o efeito contrário da temperatura, ou seja quanto mais húmido estiver o ar maior será o consumo de gás natural.

Com o auxílio da linha de tendência traçada na figura 3.18, pode-se verificar que os pontos representados exibem o comportamento esperado, maiores potências de gás natural para uma maior humidade absoluta do ar ambiente.

Seguidamente analisou-se a influência da temperatura de entrada do ar proveniente da sala dos compressores, no permutador de calor (figura 3.19).



**Figura 3.19** - Variação do consumo de gás natural com o aumento da temperatura do ar de entrada no permutador, para o artigo C.

Observa-se uma diminuição no consumo de gás natural com o aumento da temperatura do ar de entrada no permutador, tal como seria de prever.

Ponderada a análise às figuras 3.17 a 3.19, tal como seria de prever, verificou-se um aumento do consumo de gás natural com o aumento da humidade do ar e uma diminuição do mesmo com o aumento das temperaturas.

O consumo de gás natural com o aumento da humidade do ar pode aumentar ligeiramente o seu valor em, mais ou menos, 10%, uma vez que se está a aquecer o ar seco e o vapor de água que lá existe. No entanto, o principal fator no consumo de gás natural é por certo a temperatura do ar.

A situação ideal seria conseguir conciliar temperaturas ambientes mais altas com baixa humidade e ar de entrada no permutador a temperaturas superiores a 30°C.

Contudo, a temperatura e humidade do ar do salão são fatores que influenciam diretamente as condições ótimas de trabalho dos operadores. Posto isto, a única variável possível de se modificar será a temperatura do ar proveniente da sala dos compressores que, com o correto isolamento, poderá atingir temperaturas de entrada no permutador na ordem dos 60 °C.

#### 3.4. Condução de aproveitamento de ar quente

A condução projetada para o aproveitamento do ar quente proveniente dos compressores foi analisada, tendo-se verificado uma discrepância muito grande nas temperaturas lidas ao longo dos vários meses do ano.

Na tabela 3.6 estão representados alguns dos valores de temperaturas lidas ao longo deste estágio.

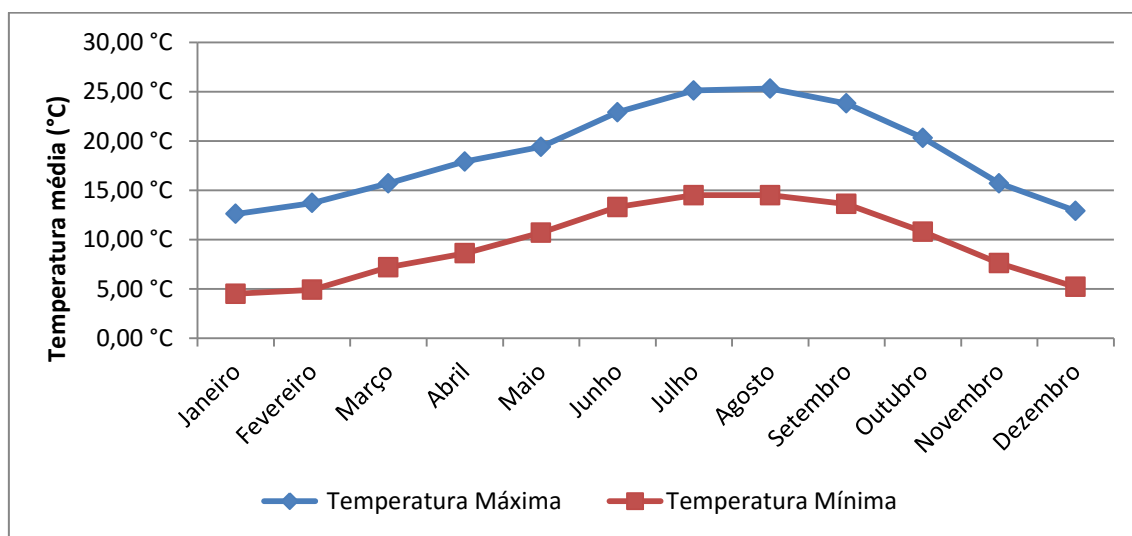
**Tabela 3.6** - Temperaturas obtidas na condução de aproveitamento de ar quente

Data	Hora	Temperatura exterior	Temperatura condução na sala dos compressores	Temperatura ar entrada no permutador
04-12-2014	09:15	9,0 °C	30,0 °C	20,0 °C
05-12-2014	09:30	6,0 °C	23,0 °C	20,0 °C
30-12-2014	08:00	-1,5 °C	22,0 °C	14,0 °C
29-01-2015	09:30	15,0 °C	44,0 °C	32,0 °C
18-02-2015	14:40	15,1 °C	44,0 °C	32,0 °C
24-02-2015	15:20	15,0 °C	44,0 °C	29,0 °C
10-05-2015	15:00	24,5 °C	50,0 °C	35,0 °C
09-06-2015	15:00	28,0 °C	62,0 °C	44,0 °C

Verifica-se que a temperatura exterior pode atingir temperaturas negativas, o que leva a um rápido arrefecimento do ar no interior da conduta, uma vez que esta não é isolada.

Foi possível efetuar leituras da temperatura em meses mais quentes (Maio e Junho), onde se verificam temperaturas na conduta da sala dos compressores na ordem dos 50°C e 60°C. No entanto, ainda existem perdas térmicas que levam a uma diminuição da temperatura de aproximadamente 13°C, desde a saída do ar na sala dos compressores até à entrada do permutador. De notar que, sem isolamento, estas temperaturas elevadas são verificadas apenas para temperaturas exteriores mais quentes.

Analisando a figura 3.20, pode-se concluir que a temperatura média máxima possível de atingir, em Lousado, ronda os 25°C nos meses de Julho e Agosto. Nos restantes meses do ano as temperaturas médias diárias são sempre inferiores, o que indica que a temperatura média do ar de entrada no permutador rondará sempre os 20°C.

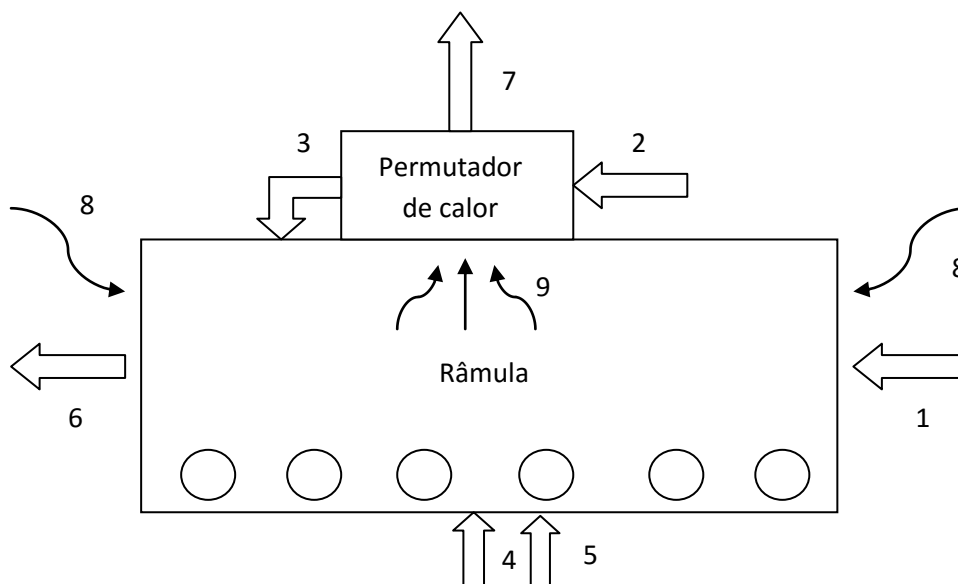


**Figura 3.20** – Variação da temperatura média anual em Lousado, Vila Nova de Famalicão. [12]

De acordo com os objetivos do presente trabalho, um dos estudos possíveis de realizar seria a avaliação do isolamento desta conduta, com o intuito de diminuir o consumo de gás natural. Este estudo poderá ser consultado no capítulo 4 do presente relatório.

### 3.5. Balanço de massa à râmula

Uma vez que não são conhecidas todas as correntes intervenientes na râmula, foi necessário efetuar um balanço de massa à mesma, considerando o esquema da figura 3.21.



**Figura 3.21** - Esquema das correntes mássicas intervenientes na râmula.

Legenda:

- Corrente 1 e 6 – Malha
- Corrente 2 – Entrada de ar da sala dos compressores
- Corrente 3 – Saída de ar para estufa 6
- Corrente 4 – Ar de combustão
- Corrente 5 - Gás Natural
- Corrente 7 – Saída gases de exaustão
- Corrente 8 – Entrada ar ambiente
- Corrente 9 – Entrada gases de combustão para o permutador

De acordo com os caudais conhecidos, que são:

- Correntes 1 e 6;
- Correntes 2, 4, 5 e 7.

Fazendo o balanço de massa ao permutador:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_7 \quad (2)$$

E o balanço ao processo:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_2 \quad (3)$$

Pode-se determinar o caudal da corrente 8.

Os valores das propriedades do ar podem ser consultados no anexo D

Na tabela 3.7 apresentam-se os valores de todos os caudais mássicos envolvidos na râmula.

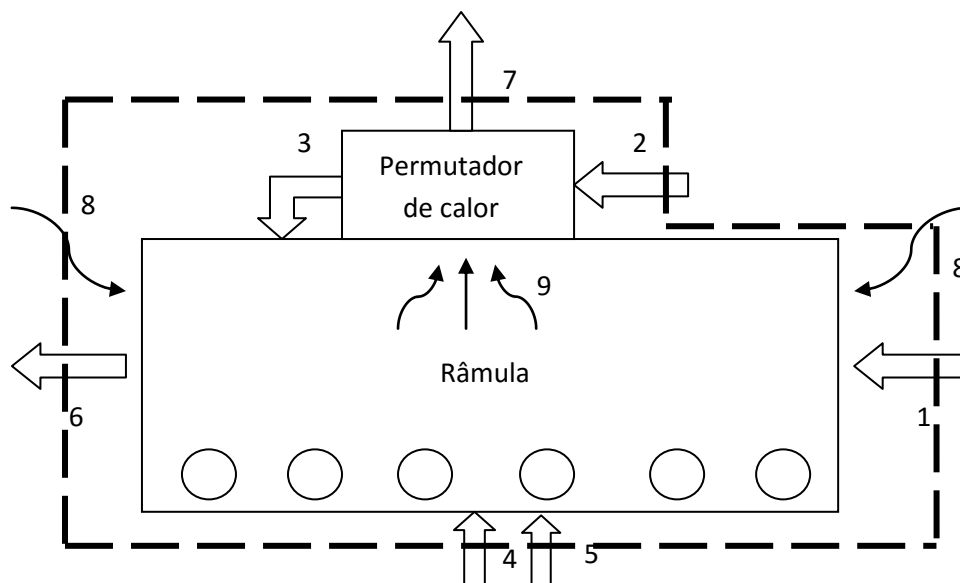
**Tabela 3.7** - Caudais mássicos das correntes

Corrente	$\dot{m}$ (kg/s)
2	0,631
3	0,631
4	0,614
5	0,008
7	1,809
8	0,556
9	1,809

Os cálculos efetuados para a construção da tabela 3.7 podem ser consultados no anexo E.

### 3.6. Balanço de energia à râmula

Para quantificar as perdas térmicas no processo de termofixação, efetuou-se um balanço de energia ao mesmo, tendo por base a fronteira ilustrada na figura 3.22.



**Figura 3.22** -Esquema da fronteira considerada para o balanço de energia.

Balanço de energia ao sistema: [11]

$$q + W + \sum E_e - \sum E_s = \Delta U \quad (4)$$

Uma vez que não há acumulação ( $\Delta U = 0$ ) nem trabalho realizado ( $W = 0$ ) e que se despreza a variação da energia cinética e potencial, fica:

$$q_p \text{ (kW)} = \sum H_s + \Delta H_{298}^0 - \sum H_e \quad (5)$$

Tendo em consideração que:

$$\Delta H_{298}^0 = PCS \times \dot{v}_{gás} + \dot{m}_{água \text{ formada na combustão}} \times \lambda_{298} = PCI \times \dot{v}_{gás} \quad (6)$$

A partir da equação (5) foram calculadas as perdas térmicas do sistema, para cada artigo produzido. Os valores obtidos são apresentados na tabela 3.8 e os cálculos podem ser consultados no anexo E.

**Tabela 3.8** – Perdas térmicas do sistema para cada artigo produzido

Artigo	q (kW)
A	118,00
B	107,92
C	101,99
D	129,14
E	131,19



## 4. Otimização Energética

Uma vez que o gás natural é a energia mais consumida na râmula, a otimização apresentada apenas tem como objetivo a diminuição deste, não havendo qualquer referência neste capítulo à energia elétrica.

Através da análise energética efetuada, foram encontrados vários pontos possíveis para otimizar o consumo de gás natural, atuando em:

- Registos mecânicos;
- Exaustão;
- Ventilação de entrada de ar fresco no permutador;
- Condução de aproveitamento de ar quente.

Tendo sempre em vista a qualidade do produto final, pois sem esta as otimizações não poderiam ser adotadas, a qualidade da malha foi testada em cada ensaio, tendo-se obtido sempre resultados positivos.

Por motivos de disponibilidade de produto, não foi possível realizar ensaios de otimização em todos os artigos produzidos.

Neste capítulo são também apresentadas simulações que visam a diminuição do consumo de gás natural.

Os cálculos para a análise de dados deste capítulo podem ser consultados nos anexos F e G.

### 4.1. Ensaios de otimização efetuados

Numa primeira fase foi testada a influência dos registos mecânicos no consumo de gás natural, para três artigos (C, D e E). Como já foi referido no capítulo 2, estes têm duas funções distintas: as das estufas 2 a 5 permitem a passagem do ar quente das estufas para a condução de exaustão, a do campo 6 faz a passagem do ar da condução de insuflação para a estufa.

#### 4.1.1. Estudo da influência dos registos mecânicos

Recordando os valores apresentados na tabela 3.3, foram realizados dois ensaios distintos.

No primeiro ensaio diminuiu-se a abertura de todos os registos da posição 3 para 1,5. As condições deste ensaio bem como a potência de gás natural obtida, são apresentadas na tabela 4.1.

A % de diminuição apresentada é calculada a partir dos valores já apresentados na tabela 3.5.

**Tabela 4.1** – Variação da abertura dos registos mecânicos – Ensaio 1

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição
<b>C</b>	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	372,158	5,3%
<b>D</b>	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	435,011	1,6%
<b>E</b>	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	437,105	1,8%

Um segundo ensaio foi realizado para o artigo E, mas com nova mudança da abertura dos registos mecânicos. Neste caso, todos os registos foram colocados na posição 2 à exceção do registo da última estufa que passou para a posição 6. Os valores são apresentados na tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Variação da abertura dos registos mecânicos – Ensaio 2

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição
<b>E</b>	2	2	2	2	2	6	428,348	3,8%

Como já se referiu, este ensaio apenas foi possível de realizar para o artigo E, tendo como objetivo a abertura máxima do registo da conduta de insuflação – estufa 6 - e o fecho até à posição 2 das restantes. Como seria de prever, verificou-se também uma diminuição da potência do gás natural, tendo-se obtido uma percentagem de poupança superior à obtida para o primeiro ensaio. Isto prende-se com o facto de haver uma redução de abertura semelhante ao ensaio anterior nos registos de exaustão mas um aumento no registo de insuflação, o que leva a um aumento do caudal de ar quente a entrar para a estufa 6.

#### 4.1.2. Estudo da influência da diminuição da exaustão

Como já foi referido no capítulo anterior, apenas o artigo A é produzido em condições de operação com 30% de exaustão, sendo os restantes com 40%. Uma das justificações para este modo de operação é o fator segurança. Como o artigo A é 100% poliéster e a malha produzida mais leve, não se verifica neste produto a mesma formação de fumos na estufa e libertação de vapores da própria malha, sendo por isso suficiente uma exaustão de 30%.

No entanto, foram realizados ensaios à diminuição de exaustão para os artigos C e E, tendo-se obtido os valores apresentados na tabela 4.3. A % de diminuição tem como base os valores apresentados na tabela 3.5.

**Tabela 4.3 – Diminuição do caudal de exaustão**

Artigo	Exaustão (%)	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição
C	30	345,119	12,2%
E	30	425,991	4,3%

Pela análise da tabela verifica-se uma diminuição na potência do gás natural, sendo este aumento maior para o artigo C. Com a realização deste ensaio constatou-se que a exaustão exerce uma maior influência no consumo de gás natural do que aquela verificada no ensaio da variação dos registos mecânicos, para os respetivos artigos. É de salientar que durante os ensaios não se verificaram quaisquer saídas de fumos pelas aberturas laterais das estufas.

#### 4.1.3. Estudo da influência dos registos mecânicos e diminuição da exaustão

Foi também possível testar a combinação da diminuição da exaustão com a variação de abertura dos registos mecânicos, no entanto só foi possível para o artigo E (tabela 4.4).

**Tabela 4.4 – Diminuição da abertura dos registos mecânicos com diminuição da exaustão**

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6	Exaustão (%)	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição
E	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	30	421,780	5,3%

Observa-se que este ensaio foi aquele onde se obteve uma maior percentagem de diminuição do consumo de gás natural, para este artigo. Este valor já era de prever uma vez que pelos ensaios anteriores se tinha verificado uma diminuição na potência de gás natural.

Pela análise dos ensaios anteriores, a situação ideal seria:

- Estufas 2 a 5 com registo mecânico na posição 2;
- Estufa 6 com registo mecânico na posição 6;
- 30% de exaustão.

Contudo, por motivos alheios a este trabalho não foi possível verificar o comportamento do consumo de gás natural na conjugação destes ensaios.

#### 4.2. Ensaios de otimização simulados

Com o objetivo de verificar o consumo de gás natural, não sendo possível a realização experimental, foram simuladas alterações das características da corrente de entrada de ar fresco no permutador, vindo da sala dos compressores.

Qualquer parâmetro alterado, seja a temperatura ou o caudal da corrente de ar de insuflação, vai provocar a alteração das temperaturas das correntes de saída do permutador.

Desta forma, para se determinar as temperaturas de saída de ambas as correntes, recorreu-se ao método  $\varepsilon$  – NTU. [13]

Este método define a eficiência térmica de um permutador como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{m\acute{a}x}} \quad (7)$$

Por sua vez:

$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = (\dot{m}cp)_{min} \times \Delta T_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = T_{qe} - T_{fe} \quad (9)$$

O valor de  $\varepsilon$  é função de 2 parâmetros:

$$NTU_{min} = \frac{UA}{(\dot{m}cp)_{min}} \quad (10)$$

$$C^* = \frac{(\dot{m}cp)_{min}}{(\dot{m}cp)_{máx}} \quad (11)$$

Foi calculado o produto UA, a partir da equação de projeto de um permutador:

$$q = UA\Delta T_{ml}F \quad (12)$$

Este valor foi assumido como constante para as restantes condições de trabalho impostas. Deste modo, a partir da equação (10) calculou-se o valor de NTU<sub>min</sub>.

Pelas equações apresentadas na tabela H.2 do anexo H, determinou-se  $\varepsilon$  que permitiu, a partir da equação (7), calcular o valor da potência transferida. Desta forma, foi possível calcular a temperatura dos gases de exaustão. Com esse valor foi obtido o consumo de gás natural pelo balanço de energia, dado pela equação (5).

Este exemplo de cálculo pode ser consultado no anexo F.

#### 4.2.1. Estudo da influência do aumento da temperatura de entrada no permutador

Assumindo que, com o correto isolamento da conduta exterior, a temperatura do ar de entrada no permutador poderá chegar até 60°C, foram calculadas as potências consumidas para cada artigo (tabela 4.5).

**Tabela 4.5** – Potência do gás natural com o aumento da temperatura do ar de entrada

Artigo	40°C	% diminuição	50°C	% diminuição	60°C	% diminuição
<b>A</b>	332,88	1,49%	325,89	3,56%	321,24	4,93%
<b>B</b>	394,56	1,18%	388,74	2,64%	384,09	3,81%
<b>C</b>	388,74	1,09%	382,92	2,57%	378,27	3,76%
<b>D</b>	437,63	0,97%	432,97	2,03%	427,15	3,34%
<b>E</b>	441,12	0,93%	436,46	1,97%	430,64	3,28%

Como seria de esperar, à medida que a temperatura aumenta, diminui a potência consumida de gás natural, sem qualquer aumento no caudal do ar de entrada (30% de insuflação).

Os cálculos correspondentes aos valores apresentados na tabela 4.5 podem ser consultados no anexo F.

#### 4.2.2. Estudo da influência do aumento da ventilação de entrada do ar no permutador

Assumindo como temperatura a média das temperaturas escolhidas no cálculo anterior (50°C), foram calculadas as potências do gás natural, que se encontram apresentadas na tabela 4.6.

**Tabela 4.6** - Potência de gás natural com o aumento do caudal de insuflação, para T=50°C

Caudal de insuflação	Artigo	Potência (kW)	% diminuição
40%	A	338,7	0,06%
	B	392,2	1,77%
	C	382,9	2,57%
	D	426,0	3,61%
	E	431,8	3,02%
50%	A	331,7	1,83%
	B	385,3	3,51%
	C	377,1	4,05%
	D	416,7	5,71%
	E	422,5	5,11%
60%	A	324,7	3,90%
	B	377,1	5,56%
	C	372,4	5,24%
	D	410,9	7,03%
	E	416,7	6,42%
70%	A	320,1	5,28%
	B	372,4	6,72%
	C	367,8	6,42%
	D	405,0	8,35%
	E	410,9	7,73%
80%	A	316,6	6,31%
	B	364,3	8,76%
	C	362,0	7,90%
	D	398,1	9,93%
	E	403,9	9,29%
90%	A	314,3	7,00%
	B	359,6	9,93%
	C	357,3	9,09%

<b>90 %</b>	D	392,2	11,24%
	E	398,1	10,60%
<b>100 %</b>	A	309,6	8,38%
	B	355,0	11,09%
	C	352,7	10,27%
	D	387,6	12,30%
	E	393,4	11,65%

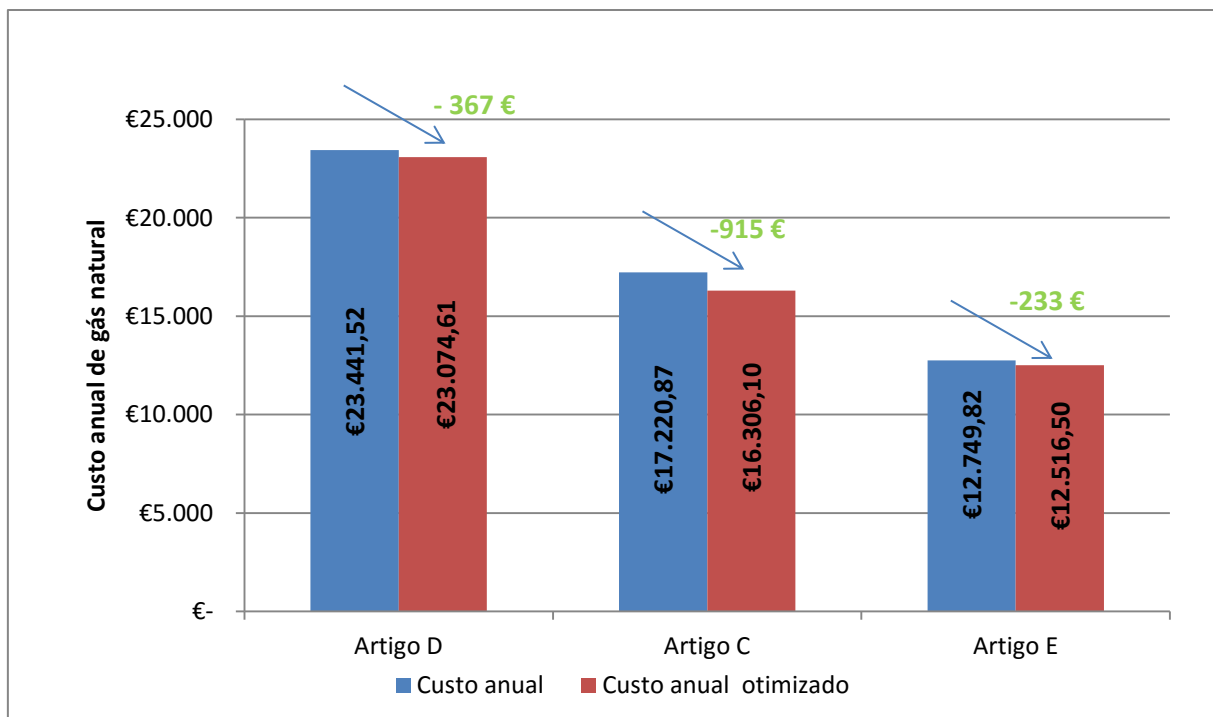
A potência do gás natural foi calculada até ao caudal de insuflação máximo. Se for possível assegurar uma temperatura de ar de entrada no permutador de 50°C, então o ideal será colocar a ventilação de insuflação a 100%, de forma a se atingir diminuições no consumo de gás natural na ordem dos 11%.

#### 4.3. Análise Económica

Para os ensaios descritos no subcapítulo anterior verificou-se, para todos, uma diminuição no consumo de gás natural. A nível económico foram calculados os gastos anuais de gás natural, tendo por base a estimativa da produção total para o ano de 2015, fornecida pela empresa. Esta estimativa foi convertida para total horário de produção e pode ser consultada na tabela G1, no anexo G

Os cálculos para a construção das figuras 4.1 a 4.6 podem ser consultados no anexo G.

Nas figuras 4.1 e 4.2 estão representadas as poupanças anuais obtidas para os ensaios 1 e 2, respetivamente. O ensaio 1 corresponde à diminuição dos registos mecânicos da posição 3 para 1,5.

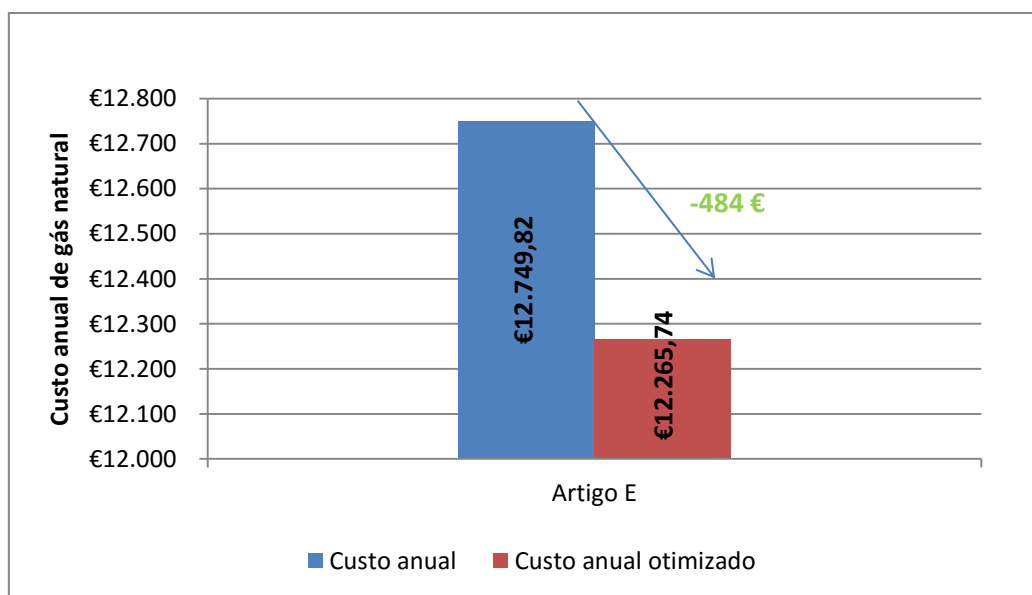


**Figura 4.1** – Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos (Ensaio 1 – Tabela 4.1).

Pela análise da figura 4.1 verifica-se que a diminuição da abertura dos registos leva a uma poupança anual de 1.515€, para os artigos C, D e E, sendo o artigo C aquele que revela uma maior poupança.

O ensaio 2 corresponde à colocação dos registos mecânicos das estufas 2 a 5 na posição 2 e da última estufa na posição 6.

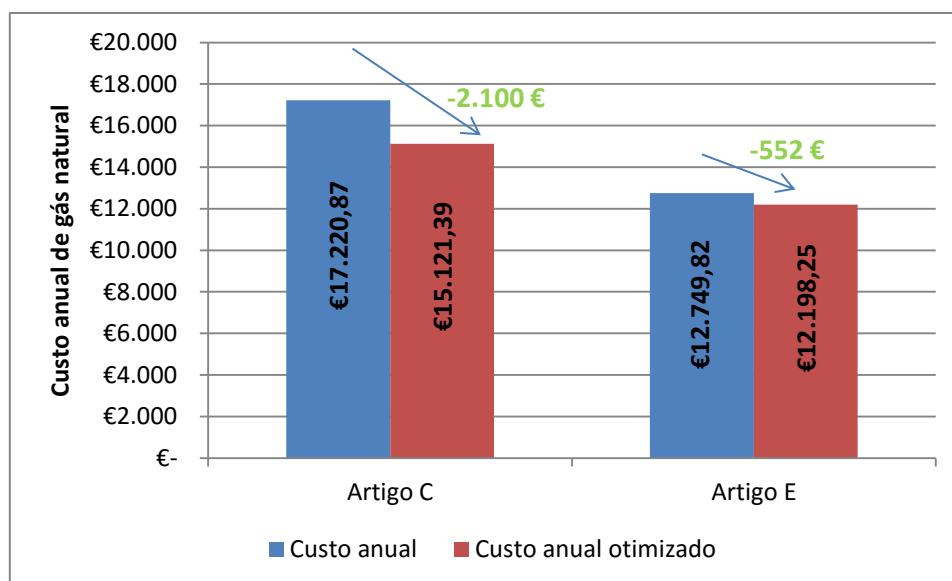




**Figura 4.2** - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos (Ensaio 2 – Tabela 4.2).

Verifica-se para o artigo E o dobro da poupança no ensaio 2, relativamente ao ensaio 1, o que indica que para este caso esta deverá ser a otimização a adotar. Não só por questões económicas mas também por questões de segurança, ou seja uma ligeira abertura dos registos para a posição 2, ao invés da posição 1,5, reduz o risco de acumulação de gases e resíduos no interior das estufas em contacto com fibras e, consequentemente, o risco de incêndio.

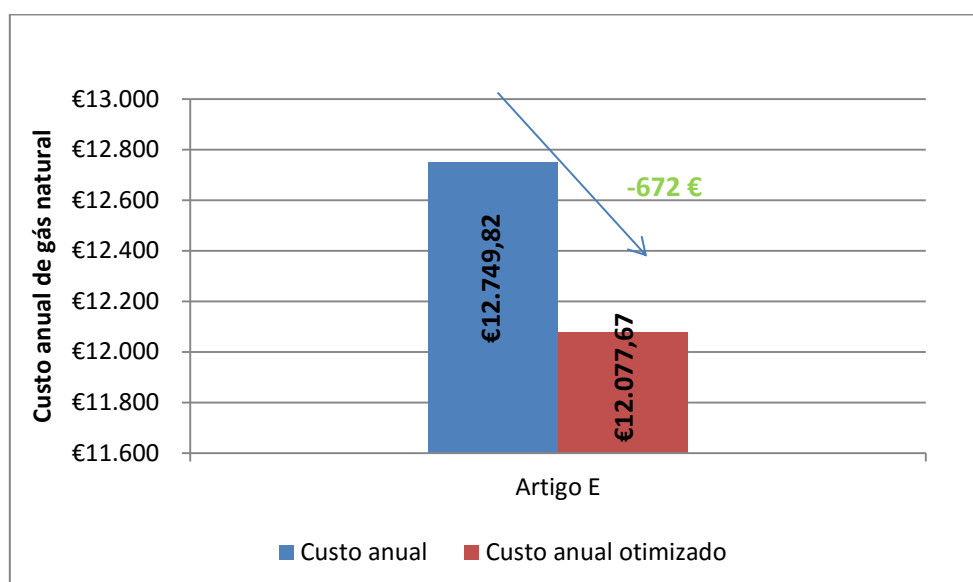
Na figura 4.3 compara-se os gastos anuais de gás natural por alteração do caudal de exaustão, para os artigos C e E.



**Figura 4.3** - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização de exaustão.

A diminuição da exaustão apresenta um valor de poupança anual de cerca de 2.650 €, tendo em conta que apenas dois dos artigos produzidos puderam ser testados. Analisando o artigo C, esta otimização é a mais rentável pois, só para este artigo, é revelada uma poupança anual de gás natural de 2.100 €.

Na figura 4.4 está representada a poupança anual obtida para a diminuição da abertura dos registos com o caudal de exaustão.

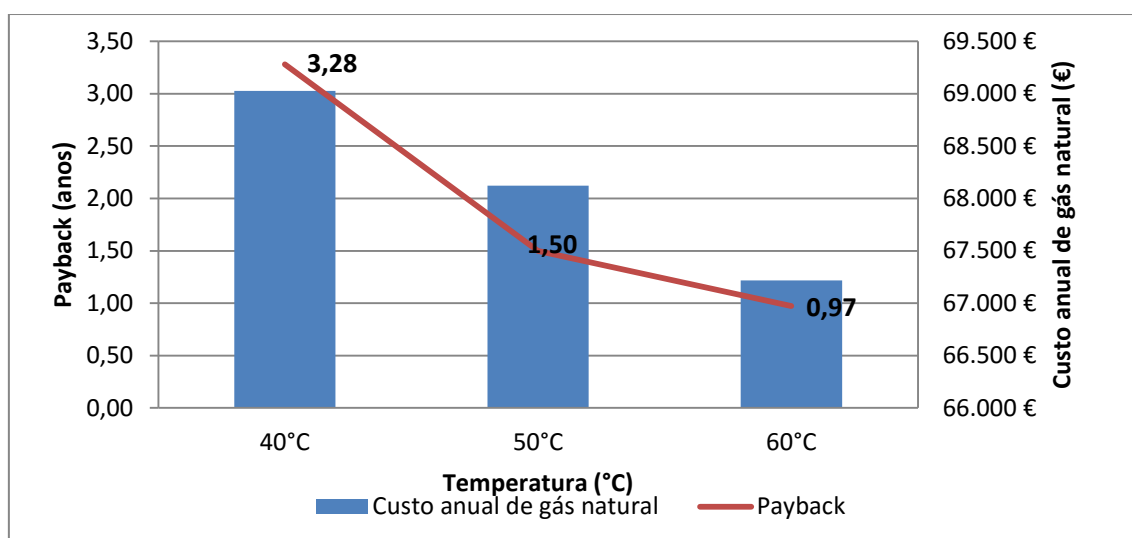


**Figura 4.4** - Comparação dos gastos anuais de gás natural para a otimização dos registos mecânicos e diminuição da exaustão.

Fazendo uma análise ao artigo em que foram testadas as diferentes formas de otimização (artigo E), constata-se que a maior poupança advém da diminuição da exaustão com a diminuição da abertura dos registos (figura 4.4). No entanto, por uma questão de segurança nas estufas da râmula, a melhor opção será apenas diminuir a exaustão, mantendo os registos com a abertura correspondente à operação normal.

Relativamente ao aumento da temperatura do ar de entrada no permutador, esta só será possível recorrendo a um isolamento térmico da conduta exterior, o qual foi orçamentado por uma empresa externa por 2.500 €.

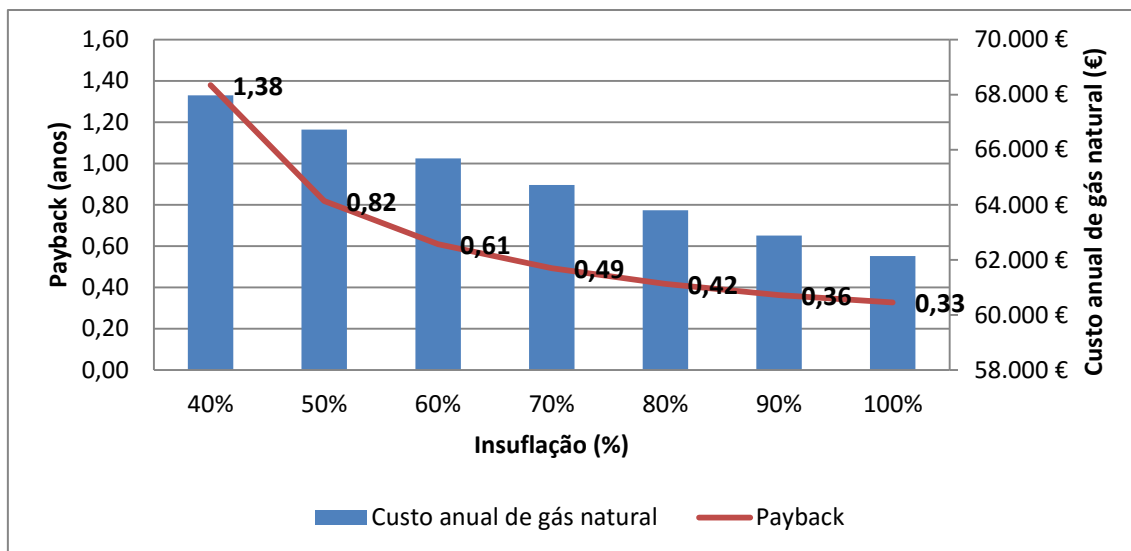
Face a este investimento, foi calculado o *payback* para cada situação analisada no capítulo 4.2, tendo em conta que o gasto total de gás natural nesta secção para este ano poderá ascender aos 69.789,11€. Este valor foi calculado com base no consumo de gás natural e as horas de trabalho anuais estimadas para cada artigo, podendo o seu cálculo ser consultado no anexo G.



**Figura 4.5** – Variação do *payback* com a temperatura do ar de entrada no permutador.

Pela análise da figura 4.5 constata-se que, para temperaturas de ar de entrada de 60°C, o *payback* do investimento é inferior a 1 ano, havendo uma poupança de gás natural de cerca de 2.500 €/ano.

Assumindo uma temperatura média de entrada do ar no permutador de 50°C, como já foi referido anteriormente, foi calculado o retorno do investimento com o aumento do caudal de insuflação (figura 4.6).



**Figura 4.6** - Variação do *payback* com o caudal de insuflação, com temperatura de entrada de 50°C.

Entre os 40% e os 60% de insuflação a diminuição do *payback* é acentuada, tendo a partir dos 70% uma diminuição mais constante e menor.

O custo anual de gás natural varia entre os 68.000 € e os 62.000 €, o que se traduz numa poupança entre os 1.800 € (40% de insuflação) e os 7.600 € (100% de insuflação), respetivamente.

Como se verificou pela análise da tabela 4.6, para uma temperatura do ar de entrada de 50°C, aproximadamente, utilizando o caudal de insuflação a 100% levará a uma diminuição do consumo de gás natural, o que por sua vez leva a uma diminuição acentuada do período de retorno do investimento do isolamento.

Os valores apresentados poderão sempre sofrer mudanças, uma vez que foram calculados com base numa estimativa de produção.

## 5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O trabalho realizado ao longo destes meses de estágio permitiu analisar os consumos de gás natural relativos aos artigos fabricados atualmente na área das malhas da C-ITA, assim como o estudo de medidas que permitam, sem danos no produto final, a diminuição do consumo de gás natural.

Verificou-se que os artigos D e E, compostos por poliéster e algodão, são os que apresentam um maior consumo de gás natural, pois são os que necessitam de maiores temperaturas de operação para a termofixação.

Concluiu-se que o gás natural representa mais de 50% da energia necessária para a produção de cada artigo. Face a essa percentagem foram estudadas otimizações possíveis de implementar para reduzir o gasto anual desta utilidade.

Sem a necessidade de qualquer investimento, consegue-se uma poupança anual de 3.000 €, com a diminuição do caudal dos gases de exaustão para 30%.

Foi estudada a possibilidade de isolamento e revestimento térmico da conduta exterior projetada para o reaproveitamento energético do ar dos compressores, tendo-se obtido um orçamento de 2.500 €. Face a este investimento, foi calculado o *payback* tendo em conta duas variáveis – a temperatura que se iria conseguir atingir e o caudal de insuflação.

Numa primeira análise admitiu-se uma gama de temperaturas entre os 40°C e os 60°C, com um caudal de insuflação de 30%. O *payback* obtido varia entre os 0,97 e os 3,28 anos.

Numa segunda fase admitiu-se uma temperatura média do estudo realizado anteriormente (50°C), aumentando o caudal de insuflação até 100%. O período de retorno obtido varia entre os 0,33 e os 1,38 anos, podendo as poupanças anuais atingirem os 7.600 €.

A realização deste trabalho nem sempre foi fácil, tendo-se verificado algumas dificuldades ao longo do estágio, nomeadamente:

- Escassez de registos dos consumos dos artigos, para ter uma base de comparação;
- Escassez de documentação relativa ao arranjo das condutas internas da râmula;
- A ocorrência de paragens/avarias da râmula durante a fase de ensaios;
- Mudança das condições de operação, levando à invalidação de dados retirados;
- Impossibilidade de testar as otimizações em todos os artigos;
- Impossibilidade de testar as otimizações ao longo de um grande período de tempo.

#### Propostas para trabalhos futuros

Como não foi possível estudar todas medidas possíveis para otimizar esta secção da empresa, propõe-se como trabalhos futuros:

- Aproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão;
- Aproveitamento do ar quente resultante do arrefecimento da malha;
- Pré-aquecimento do ar dos queimadores.

## Bibliografia

- [1] - Manual de acolhimento da C-ITA
- [2] - Auditene, Projetos e Auditorias Energéticas, Lda, 2012
- [3] - Decreto- Lei nº 71/2008
- [4] - ADENE – Manual de Eficiência Energética na Indústria, 2004
- [5] - <http://www.teonline.com/knowledge-centre/industrial-knitting-process.html> (acedido a 10 de Junho de 2015)
- [6] - A.R. Anand, “Handbook of Technical Textile”. Woodhead Publishing Limited, 2000
- [7] - “Alta Roda”, nº82 – Revista do Grupo Continental em Portugal
- [8] - “Acabamentos Mecânicos”, apontamentos Consulgés – Consultadoria Empresarial
- [9] - “Instruções de operação”, MONTEX 6500-6F TwinAir 45-t-80014
- [10] - <http://www.monfongs.com/MON/display.do?pagename=monProductsMontax6500&passData=mainData10> (acedido a 14 de Agosto de 2015)
- [11] - Houghen, Olaf A., Watson, Kenneth M., Ragatz, Roland A.; “Princípios dos Processos Químicos”, Lopes da Silva, 1984
- [12] - <http://pt.climate-data.org/location/564169/> (acedido a 30 de Setembro de 2015)
- [13] - Incropera, F.P. and De Witt, D.P.; “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 2002
- [14] - <http://www.matweb.com> (acedido a 2 de Março de 2015)
- [15] - <http://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e> (acedido a 23 de Maio de 2015)
- [16] - David, M.Himmeblau. “Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering”. Prentice-Hall inc., 3ª edição, 1974.





## Anexo A – Consumos energéticos dos artigos

Os valores obtidos para o cálculo das potências são apresentados nas tabelas A.1 e A.2.

$$Potência[kW] = \frac{Energia}{tempo\ de\ ensaio} \quad (A1)$$

**Tabela A. 1** - Valores de energia para o cálculo das potências consumidas na râmula para os artigos A, B e C

Artigo	Tempo de ensaio (min)	Consumo Eletricidade (kWh)	Potência Eletricidade (kW)	Consumo A.C. (kWh) <sup>(1)</sup>	Potência A.C. (kW)	Consumo G.N. estufas (kWh) <sup>(2)</sup>	Potência G.N. (kW)
A	105	58,21	33,26	3,82	2,18	546,38	312,22
	43	28,96	40,42	1,83	2,56	244,32	340,91
	43	29,89	41,70	1,90	2,65	253,20	353,30
	53	33,94	38,43	2,12	2,40	299,84	339,45
	77	48,94	38,14	3,03	2,36	433,11	337,49
	41	29,78	43,58	1,57	2,30	237,65	347,79
	42	30,34	43,35	1,56	2,23	233,21	333,16
	47	34,29	43,77	1,78	2,27	268,75	343,08
	61	44,77	44,04	2,47	2,43	348,71	342,99
	30	21,30	42,60	1,12	2,25	164,36	328,72
B	76	50,51	39,88	3,17	2,49	508,62	401,54
	45	30,65	40,87	1,90	2,53	304,29	405,71
	35	23,17	39,73	1,43	2,45	230,99	395,98
	50	30,02	36,02	2,12	2,54	339,82	407,79
	58	33,62	34,78	2,34	2,42	384,24	397,49
	40	23,94	35,92	1,66	2,49	268,75	403,12
	30	18,80	37,60	1,29	2,59	204,34	408,68
	37	23,96	38,85	1,49	2,42	235,43	381,78
	32	21,66	40,61	1,33	2,49	208,78	391,46
	72	47,71	39,76	2,99	2,49	488,63	407,20
C	40	27,55	41,33	1,72	2,58	268,75	403,12
	60	41,83	41,83	2,49	2,48	404,23	404,23
	50	33,24	39,88	2,03	2,43	328,72	394,46
	35	23,95	41,06	1,46	2,51	222,11	380,75
	30	20,25	40,50	1,39	2,77	219,89	439,77
	44	26,32	35,89	1,80	2,45	288,74	393,73
	122	77,35	38,04	4,81	2,37	737,39	362,65
	30	20,02	40,04	1,22	2,44	197,68	395,35
	48	31,72	39,65	1,99	2,50	322,05	402,57
	40	31,25	46,87	1,68	2,52	273,19	409,79
	30	22,35	44,70	1,24	2,47	195,45	390,91
	42	28,38	40,55	1,75	2,50	279,85	399,79
	59	40,08	40,76	2,37	2,41	397,57	404,31
	28	18,31	39,23	1,13	2,41	175,46	375,99
	40	26,47	39,71	1,57	2,35	255,42	383,13
	22	14,51	39,58	0,86	2,34	137,71	375,56

**Tabela A. 2** - Valores de energia para o cálculo das potências consumidas na râmula para os artigos D e E

Artigo	Tempo de ensaio (min)	Consumo E.E. (kWh)	Potência E.E. (kW)	Consumo A.C. (kWh) <sup>(1)</sup>	Potência A.C. (kW)	Consumo G.N. estufas (kWh) <sup>(2)</sup>	Potência G.N. (kW)	Consumo G.N. caldeira (kWh) <sup>(2)</sup>	Potência G.N. caldeira (kW)
D	90	58,51	39,01	2,701	1,80	652,99	435,33	133,34	88,84
	50	34,16	40,99	2,095	2,51	377,58	453,10	62,20	74,63
	35	23,18	39,73	1,448	2,48	259,86	445,48	52,63	90,24
	38	23,44	37,02	1,167	1,84	282,08	445,38	43,44	68,53
	43	28,51	39,78	1,751	2,44	317,61	443,18	69,72	97,31
	40	25,16	37,74	1,673	2,51	297,62	446,43	82,36	123,50
	49	31,75	38,87	2,015	2,47	353,15	432,43	91,98	112,57
	71	57,76	48,81	3,279	2,77	599,69	506,78	98,45	106,50
	41	25,33	37,07	1,544	2,26	282,08	412,79	86,60	126,67
	35	26,63	45,66	1,627	2,79	299,84	514,02	91,87	157,40
	54	27,13	30,15	1,656	1,84	297,62	330,69	94,35	104,76
	41	25,90	37,91	1,570	2,30	288,74	422,54	90,21	131,93
	28	19,09	40,91	1,156	2,48	213,22	456,90	65,94	141,16
E	30	19,19	38,37	1,164	2,33	228,77	457,54	40,48	80,85
	40	25,29	37,94	1,604	2,41	306,51	459,76	69,74	104,58
	32	20,06	37,61	1,299	2,44	248,76	466,42	52,13	97,70
	35	24,91	42,71	1,386	2,38	244,32	418,83	Sem leitura	---
	39	28,24	43,45	1,553	2,39	275,41	423,71	Sem leitura	---

<sup>(1)</sup> – Fator de conversão médio utilizado: 0,1245 kWh/m<sup>3</sup><sup>(2)</sup> - Fator de correção médio utilizado: 1,9083 (adimensional)<sup>(2)</sup> - PCS médio utilizado: 11,639 kWh/m<sup>3</sup>

## Anexo B – Consumos Específicos

Uma vez que nos standards da C-ITA o consumo específico das malhas é apresentado por cada 10.000m, o seu cálculo foi efetuado da seguinte forma:

$$CE \left[ \frac{kWh}{10.000 m} \right] = \frac{\text{Consumo de Energia}}{\text{Produção}} \times 10000 \quad (B1)$$

Nas tabelas B.1 a B.3 são apresentados os valores retirados em cada ensaio, para o cálculo dos consumos específicos dos vários artigos estudados.

Como se pode verificar pela tabela B.1, cada tear tem uma designação própria.

**Tabela B. 1** - Valores de energia para o cálculo dos CE nos teares

Artigo	Tear	Produção de ensaio (m)	Consumo E.E. (kWh)	Consumo A.C. (kWh) <sup>(1)</sup>
<b>A</b>	KLT2-01	514,03	5,15	5,24
	KLT2-02	430,98	4,04	2,99
<b>B</b>	KLT4-02	201,42	3,30	0,62
<b>C</b>	KLT3-01	301,76	5,74	2,82
	KLT3-02	308,62	5,68	2,06
	KLT3-03	291,26	5,38	2,03
	KLT3-04	308,55	6,15	3,85
<b>D</b>	KLT1-01	299,53	5,81	6,57
	KLT1-02	119,42	2,62	2,07
<b>E</b>	KLT5-01	323,12	6,13	6,70
	KLT5-02	367,60	7,29	5,16

**Tabela B. 2** - Valores de energia para o cálculo dos CE na râmula para os artigos A, B e C

Artigo	Produção de ensaio (m)	Consumo E.E. (kWh)	Consumo A.C. (kWh) <sup>(1)</sup>	Consumo G.N. estufas (kWh) <sup>(2)</sup>
<b>A</b>	3.254	58,21	3,82	546,38
	1.527	28,96	1,83	244,32
	1.616	29,89	1,90	253,20
	1.929	33,94	2,12	299,84
	2.781	48,94	3,03	433,11
	1.406	29,78	1,57	237,65
	1.520	30,34	1,56	233,21
	1.703	34,29	1,78	268,75
	2.024	44,77	2,47	348,71
	1.043	21,30	1,12	164,36
<b>B</b>	2.680	50,51	3,17	508,62
	1.696	30,65	1,90	304,29
	1.250	23,17	1,43	230,99
	1.987	30,02	2,12	339,82
	2.128	33,62	2,34	384,24
	1.561	23,94	1,66	268,75
	1.100	18,80	1,29	204,34
	1.420	23,96	1,49	235,43
	1.299	21,66	1,33	208,78
<b>C</b>	2.650	47,71	2,99	488,63
	1.580	27,55	1,72	268,75
	2.404	41,83	2,49	404,23
	1.905	33,24	2,03	328,72
	1.371	23,95	1,46	222,11
	1.313	20,25	1,39	219,89
	1.654	26,32	1,80	288,74
	4.474	77,35	4,81	737,39
	1.136	20,02	1,22	197,68
	1.907	31,72	1,99	322,05
	1.510	31,25	1,68	273,19
	1.190	22,35	1,24	195,45
	1.668	28,38	1,75	279,85
	2.265	40,08	2,37	397,57
	1.033	18,31	1,13	175,46
	1.562	26,47	1,57	255,42
	845	14,51	0,86	137,71

**Tabela B. 3** - Valores de energia para o cálculo dos CE na râmula para os artigos D e E

Artigo	Produção de ensaio (m)	Consumo E.E. (kWh)	Consumo A.C. (kWh) <sup>(1)</sup>	Consumo G.N. estufas (kWh) <sup>(2)</sup>	Consumo G.N. caldeira (kWh) <sup>(2)</sup>
<b>D</b>	3.240	58,51	2,701	652,99	133,34
	2.005	34,16	2,095	377,58	62,20
	1.303	23,18	1,448	259,86	52,63
	1.276	23,44	1,167	282,08	43,44
	1.370	28,51	1,751	317,61	69,72
	1.517	25,16	1,673	297,62	82,36
	1.946	31,75	2,015	353,15	91,98
	2.920	57,76	3,279	599,69	98,45
	1.511	25,33	1,544	282,08	86,60
	1.501	26,63	1,627	299,84	91,87
	1.575	27,13	1,656	297,62	94,35
	1.568	25,90	1,570	288,74	90,21
	1.159	19,09	1,156	213,22	65,94
	1.070	19,19	1,164	228,77	40,48
	1.506	25,29	1,604	306,51	69,74
<b>E</b>	1.153	20,06	1,299	248,76	52,13
	1.352	24,91	1,386	244,32	Sem leitura
	1.466	28,24	1,553	275,41	Sem leitura

Para a construção do gráfico de distribuição de consumo por processo, figuras 3.8, 3.10, 3.12, 3.14 e 3.16, foi necessário converter os kWh de energia elétrica e gás natural para tep que, de acordo com o SGCIE, têm o seguinte valor:

**Tabela B. 4** - Fatores de conversão para tep

Forma de energia	Fator de conversão
Gás Natural	0,000905 tep/m <sup>3</sup>
Energia Elétrica	0,000215 tep/kWh

## Anexo C – Análise das temperaturas

**Tabela C. 1** - Variação da potência de gás natural com a temperatura ambiente

Artigo	Temperatura ambiente (°C)	Potência de gás natural (kW)
<b>A</b>	22,5	339,69
	22,9	353,30
	23,0	312,22
	27,2	342,99
	28,6	328,72
	30,4	341,34
<b>B</b>	20,8	401,54
	21,6	402,64
	21,8	405,71
	23,0	395,98
	23,4	408,68
	23,9	403,12
	29,3	386,62
<b>C</b>	17,6	407,20
	19,0	403,12
	21,8	399,35
	22,8	416,75
	23,4	395,35
	25,5	402,57
	25,7	380,75
	26,5	409,79
	27,3	375,99
	28,0	390,91
	28,2	362,65
	29,2	388,99
	29,5	355,37
	30,8	402,05
	31,7	379,35
<b>D</b>	20,1	435,33
	22,2	446,43
	22,4	432,43
	23,4	445,38
	24,1	449,29
	24,2	506,78
	26,6	443,18
	27,5	463,41
	29,4	330,69
	30,0	439,72
	30,0	439,72
<b>E</b>	24,5	457,54
	24,8	463,09
	29,9	421,27

**Tabela C. 2** - Variação da potência de gás natural com a humidade ambiente

Artigo	Humidade ambiente (%)	Potência de gás natural (kW)
<b>A</b>	28,7	341,34
	32,1	328,72
	33,4	342,99
	37,3	353,30
	39,8	340,91
	45,1	338,47
	46,8	312,22
<b>B</b>	25,1	403,12
	26,3	386,62
	31,4	408,68
	34,2	402,64
	38,7	395,98
	43,4	401,54
	43,5	405,71
<b>C</b>	21,6	355,37
	25,9	362,65
	26,9	380,75
	38,1	416,75
	38,6	390,91
	42,0	403,12
	43,3	379,35
	43,5	402,05
	43,8	375,99
	44,2	402,57
	48,7	409,79
	49,8	399,35
	50,9	395,35
	53,8	407,20
	55,7	388,99
<b>D</b>	24,8	449,29
	33,9	432,43
	37,5	443,18
	41,3	435,33
	41,9	446,43
	46,3	330,69
	46,7	445,38
	49,3	439,72
	50,8	506,78
	55,8	463,41
<b>E</b>	28,8	463,09
	30,9	421,27
	60,8	457,54

**Tabela C. 3** - Variação da potência de gás natural com a temperatura do ar de entrada no permutador

Artigo	Temperatura ar entrada permutador (°C)	Potência de gás natural (kW)
A	25	339,45
	26	337,49
	27	312,22
	28	340,91
	30	353,30
	34	342,99
	37	328,72
	42	341,34
B	23	405,71
	24	401,54
	27	402,64
	28	395,98
	29	405,90
	38	386,62
C	23	407,20
	24	403,12
	26	404,23
	27	405,83
	29	388,99
	31	409,79
	32	402,57
	33	380,75
	35	383,45
	37	362,65
	40	355,37
	42	402,05
	43	375,56
	44	383,13
D	21	435,33
	24	432,43
	27	446,43
	28	445,38
	31	462,13
	36	412,79
	37	514,02
	38	330,69
	39	439,72
E	22	457,54
	29	459,76
	31	466,42
	38	421,27



## Anexo D – Características do ar

### Anexo D1 - Ar atmosférico [14]

**Tabela D. 1** - Capacidade calorífica do ar à pressão atmosférica

Temperatura (°C)	Cp (kJ/kg.K)
0	1,011
20	1,012
40	1,014
60	1,017
80	1,019
100	1,022
200	1,035
300	1,047
400	1,059
500	1,076
1000	1,139

**Tabela D. 2** - Densidade do ar à pressão atmosférica

Temperatura (°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
-40	1,5140
0	1,2930
5	1,2690
10	1,2470
15	1,2250
20	1,2040
25	1,1840
30	1,1650
40	1,1270
50	1,1090
60	1,0600
70	1,0290
80	0,9996
90	0,9721
100	0,9461
200	0,7461
300	0,6159
400	0,5243

Anexo D.2 - Ar de exaustão

Com o auxílio de um analisador de gases, foram analisados os gases de exaustão do permutador, tendo obtido os valores apresentados na tabela D.3.

**Tabela D. 3** - Composição do ar de exaustão das estufas

	CO (ppm)	uCO (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
	20	304	19,6	0,79
	21	369	19,8	0,68
	18	301	19,6	0,74
	18	263	19,5	0,85
	18	218	19,2	1,02
	19	244	19,3	0,96
	19	217	19,1	1,08
	20	194	18,8	1,25
	17	330	19,9	0,62
	17	302	19,8	0,68
<b>Média</b>	19	274	19,5	0,87

## Anexo E – Balanços

Neste anexo são apresentados os exemplos de cálculo para o balanço de massa e energia realizado ao sistema, utilizando como exemplo as especificações do artigo C.

### Anexo E.1 – Balanço de massa à râmula

**Tabela E. 1** – Características do ventilador de insuflação

Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	% Ventilação	Caudal real (m <sup>3</sup> /h)
6.500	30%	1.950

**Tabela E. 2** – Características do ventilador de exaustão

Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	% Ventilação	Caudal real (m <sup>3</sup> /h)
20.000	40%	8.000

**Tabela E. 3** – Características das correntes do sistema

Corrente	Temperatura (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\dot{v}$ (m <sup>3</sup> /h)	$\dot{m}$ (kg/s)
2	30	1,165	1950	0,631
3	--	---	2480	0,631
4	25	1,184	1866	0,614
5	25	0,814 [15]	34	0,008
7	166	0,814	8000	1,809
8	25	1,184	---	0,564

Onde:  $\dot{m} = \frac{\dot{v} \times \rho}{3600}$  (E1)

Sabendo que:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = 0,631 \text{ kg/s}$$

Balanço de massa ao sistema:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_2 \leftrightarrow 1,809 = \dot{m}_8 + 0,614 + 0,631 + 0,008$$

$$\leftrightarrow \dot{m}_8 = 1,809 - (0,614 + 0,631 + 0,008) \leftrightarrow \dot{m}_8 = 0,557 \text{ kg/s}$$

Anexo E.2 – Balanço de energia à râmula – Cálculo das perdas térmicas

Recordando as equações (4), (5) e (6) do capítulo 3 e assumindo como temperatura de referência 25°C, com o auxílio da tabela D.1 foi calculado o somatório das potências de entrada e de saída, sendo necessária a equação:

$$H \text{ (kW)} = \dot{m} \times c_p \times (T - T_{ref}) \quad (E2)$$

Tabela E. 1 – Características das correntes de entrada no sistema

Entradas de energia no sistema ( $E_e$ )	Temperatura (°C)	Cp (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	$H_e$ (kW)	$\Sigma H_e$ (kW)
Malha em “verde” (1)	25	1,170	0,110	0,00	3,20
Ar de entrada no permutador (2)	30	1,013	0,631	3,20	
Ar de combustão (4)	25	1,013	0,614	0,00	
Combustível (5)	25	--	0,008	0,00	
Ar lateral (8)	25	1,013	0,557	0,00	

Tabela E. 2 – Características das correntes de saída do sistema

Saídas de energia do sistema ( $E_s$ )	Temperatura (°C)	Cp (kJ/kg.K)	$\dot{m}$ (kg/s)	$H_s$ (kW)	$\Sigma H_s$ (kW)
Malha termofixada (6)	105	1,170	0,110	10,31	261,51
Gases de exaustão (7)	166	0,987	1,809	251,20	

- Cálculo do cp dos gases de exaustão

Foi necessário calcular a capacidade calorífica dos gases de exaustão, utilizando para isso a tabela H.1.

$$C_p = (a + bT + cT^2)dT \quad (E3)$$

$$\overline{C_p} = \frac{\int_{298}^T (a + bT + cT^2)dT}{\Delta T} \quad (E4)$$

**Tabela E. 3** - Valores obtidos para o cálculo da capacidade calorífica dos gases de exaustão

	a (cal/mol.K)	b (cal/mol.K)	c (cal/mol.K)	Temperatura (°C)	(cal/mol)	Cp médio (kJ/mol K)
O <sub>2</sub>	6,085	0,003631	-0,00000171	166	892,482	0,0265
N <sub>2</sub>	6,903	-0,00038	0,00000193		971,396	0,0288

Pelos valores médios obtidos na tabela D.3, calculou-se:

$$\overline{cp} = 0,195 \times 0,0265 + 0,805 \times 0,0288 = 0,0284 \text{ kJ/(mol.K)}$$

$$MM(\text{O}_2) = 16 \times 2 = 32 \text{ g/mol}$$

$$MM(\text{N}_2) = 14 \times 2 = 28 \text{ g/mol}$$

$$MM(\text{gases de exaustão}) = \sum y_i M_i = 0,195 \times 32 + 0,805 \times 28 = 28,78 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$\overline{cp} = \frac{0,0284}{28,78 \times 10^{-3}} = 0,987 \text{ kJ/(kg.K)}$$

**Tabela E. 4** – Valores utilizados no cálculo do  $\Delta H_{298}^0$ 

PCI (kWh/m <sup>3</sup> ) [15]	$\dot{v}(\text{m}^3/\text{h})$	$-\Delta H_{298}^0$ (kW)
10,66	33,8	360,31

Pela equação (5), calculou-se:

$$q_p = 261,51 - (360,31 + 3,20) = -101,99 \text{ kW}$$

**Tabela E. 5** – Perdas térmicas nos artigos A, B, C, D e E

Artigo	Perdas (kW)
A	118,00
B	107,92
C	101,99
D	129,14
E	131,19

Anexo E.3 – Balanço ao permutador

Para se obter o produto entre o coeficiente global de transferência de calor e a área do permutador instalado, foi necessário efetuar um balanço ao permutador.

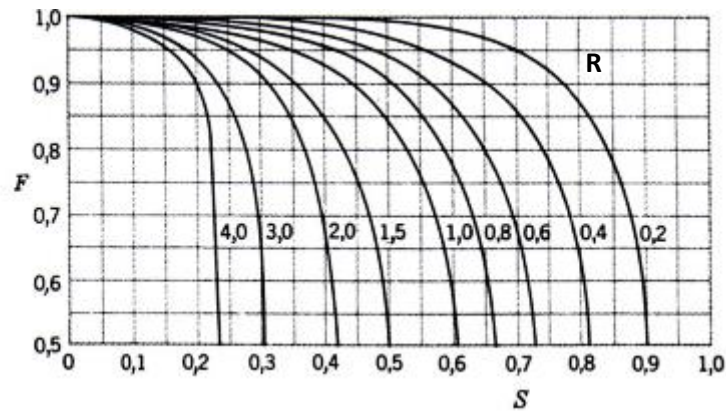
Equação projeto:  $q = UA\Delta T_{ml}F$ , onde  $\Delta T_{ml} = \frac{(T_{qe}-T_{fs})-(T_{qs}-T_{fe})}{\ln \frac{T_{qe}-T_{fs}}{T_{qs}-T_{fe}}}$  (E5)

Balanço ao permutador:  $q_q = q_f = \dot{m} \times cp \times \Delta T$  (E6)

Fluido quente:  $q_q = 1,809 \times 0,986 \times (190 - 166) \leftrightarrow q_q = 42,81 \text{ kW}$

Fluido frio:  $42,81 = 0,631 \times 1,013 \times (T_{fs} - 30) \leftrightarrow T_{fs} = 97^\circ\text{C}$

O fator de correção  $F$ , foi obtido a partir da figura E.1:



**Figura E 1** - Fator de correção para um permutador de fluxo cruzado, com uma passagem, um dos fluidos misturados e outro não misturado [13].

Onde os parâmetros adimensionais  $R$  e  $S$  são calculados da seguinte forma:

$$R = \frac{T_{fe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{qe}} \quad (E7)$$

$$S = \frac{T_{qs} - T_{qe}}{T_{fe} - T_{qe}} \quad (E8)$$

$$R = \frac{30-97}{166-190} = 2,80 \quad ; \quad S = \frac{166-190}{30-190} = 0,15 \quad \longrightarrow \quad F \approx 1$$

$$42,81 = UA \times \frac{(190 - 97) - (166 - 30)}{\ln \frac{190-97}{166-30}} \leftrightarrow UA = 0,378 \text{ kW/K}$$

## Anexo F – Ensaios de otimização simulados

### Anexo F.1 – Aumento da temperatura de entrada no permutador – corrente 2

Considerando a temperatura de entrada do ar a 60°C:

$$\text{Fluido quente: } \dot{m} \times cp = 1,809 \times 0,986 = 1,784 \text{ kJ}/(s.K)$$

$$\text{Fluido frio: } \dot{m} \times cp = 0,631 \times 1,017 = 0,642 \text{ kJ}/(s.K)$$

Utilizando a equação (10) calculou-se o valor de NTU:

$$NTU_{min} = \frac{0,378}{0,642} = 0,589$$

Com o auxílio da tabela H.2, para um permutador de fluxo cruzado, calculou-se o valor da eficiência térmica, com  $C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0,642}{1,784} = 0,360$

O valor obtido para  $\varepsilon$  foi de 0,412.

A partir desse valor e recorrendo às equações (7), (8) e (9), calcularam-se as temperaturas de saída de ambos os fluidos.

$$T_{fs} = \frac{\varepsilon \times C_{min} \times (T_{qe} - T_{fe})}{C_{min}} + T_{fe} \leftrightarrow T_{fs} = 0,412 \times (190 - 60) + 60 \leftrightarrow T_{fs} = 113,6^\circ C$$

$$T_{qs} = \frac{\varepsilon \times \dot{Q}_{max}}{\dot{m} \times cp} - T_{qe} \leftrightarrow T_{qs} = \frac{0,412 \times 83,43}{1,784} - 190 \leftrightarrow T_{qs} = 170,7^\circ C$$

Para a temperatura de entrada de 60°C calculou-se a entalpia da corrente 2, utilizando a equação (E2), tendo-se obtido o valor de 22,46 kW.

Procedeu-se da mesma forma para a entalpia da corrente 7, obtendo-se o valor de 267,28 kW para o  $\Sigma H_s$

Assumindo constantes as perdas calculadas anteriormente, pelo balanço de energia calculou-se o novo consumo de gás natural, fazendo:

$$\begin{aligned} \text{Consumo gás natural} &= \frac{\text{perdas} + \text{total de entradas} - \text{total de saídas}}{PCI} \\ \leftrightarrow \text{Consumo gás natural} &= \frac{-101,99 + 22,46 - 267,28}{-10,66} \\ \leftrightarrow \text{Consumo gás natural} &= 32,5 \frac{m^3}{h} \times 11,639 \frac{kWh}{m^3} = 378,27 \text{ kW} \end{aligned}$$

Anexo F.2 – Aumento do caudal de insuflação

Para a simulação do aumento do caudal de insuflação a forma de cálculo foi a mesma utilizada para o aumento da temperatura, mas agora mantendo constante a temperatura do ar de insuflação (50°C) e aumentando o seu caudal.

Para a temperatura de entrada de 50°C e para um caudal de insuflação de 60%, calculou-se a entalpia da corrente 2, utilizando a equação (E2), tendo-se obtido o valor de 27,89 kW.

Procedeu-se da mesma forma para as correntes de saída, obtendo-se o valor de 267,02 kW.

Assumindo constantes as perdas calculadas anteriormente, pelo balanço de energia calculou-se o novo consumo de gás natural, fazendo:

$$\text{Consumo gás natural} = \frac{\text{perdas} + \text{total de entradas} - \text{total de saídas}}{PCI}$$

$$\Leftrightarrow \text{Consumo gás natural} = \frac{-101,99 + 27,89 - 267,02}{-10,66}$$

$$\Leftrightarrow \text{Consumo gás natural} = 32,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 11,639 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 372,44 \text{ kW}$$



## Anexo G – Análise Económica

Com base na estimativa de produção anual dos artigos das malhas, foi efetuada uma análise económica aos ensaios realizados.

$$\text{Custo anual} = \text{consumo de gás natural} \times n^{\circ} \text{ horas de produção} \\ \times \text{custo de gás natural}$$

$$\text{Poupança} = \text{Custo anual} - \text{Custo anual otimizado}$$

O custo médio de gás natural utilizado é de 0,0414 €/kWh. Por motivos de confidencialidade da empresa, o custo médio do gás natural foi multiplicado por um fator de segurança, não representado o valor real aplicado à empresa.

Na tabela G.1 está representado o tempo anual necessário para a produção de cada artigo.

**Tabela G. 1** – Tempo total anual necessário para a produção dos artigos A, B, C, D e E

Artigo	Tempo total anual (h)
A	784
B	327
C	1058
D	1281
E	692

Fazendo o cálculo do custo anual para cada ensaio realizado, foram construídas as tabelas G.2 a G.6, com base nas potências apresentadas na tabela 3.5.

**Tabela G. 2** – Custo anual de gás natural para as condições normais de operação

Artigo	Potência Energia Elétrica (kW)	Potência Ar Comprimido (kW)	Potência Gás Natural Estufas (kW)	Potência Gás Natural Caldeira (kW)	Custo anual	Total anual
Artigo A	40,0	2,4	337,9	---	10.970,08 €	69.789,11 €
Artigo B	38,3	2,5	399,3	---	5.406,82 €	
Artigo C	39,9	2,5	393,0	---	17.220,87 €	
Artigo D	38,8	2,4	441,9	109,5	23.441,52 €	
Artigo E	38,8	2,5	445,3	116,0	12.749,82 €	

**Tabela G. 3** – Poupança anual obtida para a variação dos registos mecânicos (Ensaio 1)

Artigo	C	D	E
Abertura registo mecânico Estufa 2	1,5	1,5	1,5
Abertura registo mecânico Estufa 2	1,5	1,5	1,5
Abertura registo mecânico Estufa 3	1,5	1,5	1,5
Abertura registo mecânico Estufa 5	1,5	1,5	1,5
Abertura registo mecânico Estufa 5	1,5	1,5	1,5
Abertura registo mecânico Estufa 6	1,5	1,5	1,5
Potência Gás Natural (kW)	372,2	435,0	437,1
% diminuição	5,30%	1,60%	1,80%
Custo anual	16.306,10 €	23.074,61 €	12.516,50 €
Poupança	914,77 €	366,90 €	233,32 €

**Tabela G. 4** - Poupança anual obtida para a variação dos registos mecânicos (Ensaio 2)

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição	Custo anual	Poupança
E	2	2	2	2	2	6	428,3	3,80%	12.265,74 €	484,07 €

**Tabela G. 5** - Poupança anual obtida para a diminuição da exaustão

Artigo	Exaustão (%)	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição	Custo anual	Poupança
C	30	345,1	12,20%	15.121,39 €	2.099,48 €
E	30	425,9	4,30%	12.198,25 €	551,57 €

**Tabela G. 6** - Poupança anual obtida para a diminuição da exaustão com variação dos registos mecânicos

Artigo	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 2	Abertura registo mecânico Estufa 3	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 5	Abertura registo mecânico Estufa 6	Exaustão (%)	Potência Gás Natural (kW)	% diminuição	Custo anual	Poupança
E	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	30	421,8	5,27%	12.077,67 €	672,15 €

Para se calcular o *payback* do investimento no isolamento da conduta exterior foi necessário calcular a poupança obtida com o aumento da temperatura e do caudal de insuflação, tendo-se obtidos os valores representados nas tabelas G.7 a G.16, onde:

$$Payback = \frac{\text{investimento}}{\text{poupança/ano}} = \frac{2.500\text{€}}{\text{poupança/ano}} \quad (G1)$$

**Tabela G. 7** – *Payback* do investimento para T=40°C

Artigo	Consumo gás (m³/h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	28,6	332,9	10.792,43 €	762,56 €	3,28
B	33,9	394,6	5.345,78 €		
C	33,4	388,7	17.040,83 €		
D	37,6	437,6	23.215,14 €		
E	37,9	441,1	12.632,38 €		

**Tabela G. 8** - *Payback* do investimento para T=50°C

Artigo	Consumo gás (m³/h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	28,0	325,9	10.595,98 €	1.668,11 €	1,50
B	33,4	388,7	5.267,90 €		
C	32,9	382,9	16.789,06 €		
D	37,2	433,0	22.968,71 €		
E	37,5	436,5	12.499,35 €		

**Tabela G. 9** - *Payback* do investimento para T=60°C

Artigo	Consumo gás (m³/h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	27,6	321,2	10.429,54 €	2.570,85 €	0,97
B	33,0	384,1	5.206,42 €		
C	32,5	378,3	16.591,28 €		
D	36,7	427,2	22.658,91 €		
E	37,0	430,6	12.332,11 €		

**Tabela G. 10** - Payback do investimento para T=50°C e 40% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	29,1	339	10.980,20 €	1.812,89 €	1,38
B	33,7	392	5.312,92 €		
C	32,9	383	16.764,92 €		
D	36,6	426	22.568,32 €		
E	37,1	432	12.349,86 €		

**Tabela G. 11** - Payback do investimento para T=50°C e 50% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	28,5	332	10.754,49 €	3.056,82 €	0,82
B	33,1	385	5.211,10 €		
C	32,4	377	16.542,56 €		
D	35,8	417	22.117,59 €		
E	36,3	422	12.106,54 €		

**Tabela G. 12** - Payback do investimento para T=50°C e 60% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	27,9	325	10.542,16 €	4.103,48 €	0,61
B	32,4	377	5.108,77 €		
C	32,0	372	16.320,21 €		
D	35,3	411	21.786,62 €		
E	35,8	417	11.927,87 €		

**Tabela G. 13** - Payback do investimento para T=50°C e 70% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	Payback (anos)
A	27,5	320	10.377,16 €	5.070,06 €	0,49
B	32,4	377	5.108,77 €		
C	31,6	368	16.097,85 €		
D	34,8	405	21.455,15 €		
E	35,3	411	11.748,93 €		

**Tabela G. 14** - *Payback* do investimento para T=50°C e 80% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	<i>Payback</i> (anos)
A	27,2	317	10.289,97 €	5.993,64 €	0,42
B	31,3	364	4.937,11 €		
C	31,1	362	15.875,49 €		
D	34,2	398	21.123,18 €		
E	34,7	404	11.569,72 €		

**Tabela G. 15** - *Payback* do investimento para T=50°C e 90% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	<i>Payback</i> (anos)
A	27,0	314	10.185,22 €	6.901,50 €	0,36
B	30,9	360	4.868,29 €		
C	30,7	357	15.653,14 €		
D	33,7	392	20.790,71 €		
E	34,2	398	11.390,25 €		

**Tabela G. 16** - *Payback* do investimento para T=50°C e 100% de caudal de insuflação

Artigo	Consumo gás (m <sup>3</sup> /h)	Potência (kW)	Custo anual	Poupança anual total	<i>Payback</i> (anos)
A	26,6	310	10.050,00 €	7.646,20 €	0,33
B	30,5	355	4.799,47 €		
C	30,3	353	15.430,78 €		
D	33,3	388	20.584,00 €		
E	33,8	393	11.278,66 €		

## Anexo H – Tabelas de valores

Tabela H. 1 – Capacidade calorífica molar de gases [16]

Tabela C. CAPACIDADES CALORÍFICAS MOLARES DE GASES A PRESSÃO ZERO\*

$c_p^* = a + bT + cT^2 + dT^3$ ; ( $T = ^\circ K$ )

cal (mol K)

por K. A. Kobe e colaboradores «Thermochemistry for the Petrochemical Industry»  
Petroleum Refiner, Jan. 1949 até Nov. 1954

		a	b × 10 <sup>3</sup>	c × 10 <sup>6</sup>	d × 10 <sup>9</sup>	Intervalo de Temperatura °K	Erro Máx. %	Erro Médio %
<b>Hidrocarbonetos parafínicos</b>								
Metano	CH <sub>4</sub>	4,750	1,200	0,3030	-2,630	273-1500	1,33	0,57
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,648	4,124	-1,530	1,740	273-1500	0,83	0,28
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-0,966	7,279	-3,755	7,580	273-1500	0,40	0,12
Butano-n	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,945	8,873	-4,380	8,360	273-1500	0,54	0,24
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-1,890	9,936	-5,495	11,92	273-1500	0,25	0,13
Pentano-n	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1,618	10,85	-5,365	10,10	273-1500	0,56	0,21
Hexano-n	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1,657	13,19	-6,844	13,78	273-1500	0,72	0,20
<b>Hidrocarbonetos monoolefínicos</b>								
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,944	3,735	-1,993	4,220	273-1500	0,54	0,13
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,753	5,691	-2,910	5,880	273-1500	0,73	0,17
Buteno-1	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-0,240	8,650	-5,110	12,07	273-1500	0,25	0,18
Isobuteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1,650	7,702	-3,981	8,020	273-1500	0,11	0,06
cis-2-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-1,778	8,078	-4,074	7,890	273-1500	0,78	0,14
trans-2-Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2,340	7,220	-3,403	6,070	273-1500	0,54	0,12
<b>Hidrocarbonetos cicloparafínicos</b>								
Ciclo-pentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	-12,957	13,087	-7,447	16,41	273-1500	1,00	0,25
Metil-ciclo-pentano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-12,114	15,380	-8,915	20,03	273-1500	0,86	0,23
Ciclo-hexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-15,935	16,454	-9,203	19,27	273-1500	1,57	0,37
Metil-ciclo-hexano	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	-15,070	18,972	-10,969	24,09	273-1500	0,92	0,22
<b>Hidrocarbonetos aromáticos</b>								
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-8,650	11,578	-7,540	18,54	273-1500	0,34	0,20
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-8,213	13,357	-8,230	19,20	273-1500	0,29	0,18
Etil benzeno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-8,398	15,935	-10,003	23,95	273-1500	0,34	0,19
Estireno	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	-5,968	14,354	-9,150	22,03	273-1500	0,37	0,23
Cumeno	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	-9,452	18,686	-11,869	28,80	273-1500	0,36	0,17
<b>Acetilenos e Diolefinas</b>								
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5,21	2,2008	-1,559	4,349	273-1500	1,46	0,59
Metil acetileno	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	4,21	4,073	-2,192	4,713	273-1500	0,36	0,13
Dimetil acetileno	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	3,54	5,838	-2,760	4,974	273-1500	0,70	0,16
Propadieno	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	2,43	4,693	-2,781	6,484	273-1500	0,37	0,19
Butadieno-1,3	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	-1,29	8,350	-5,582	14,24	273-1500	0,91	0,47
Isopreno	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	-0,44	10,418	-6,762	16,93	273-1500	0,99	0,43
<b>Gases de combustão (intervalo pequeno)</b>								
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	6,903	-0,03753	0,1930	-0,6861	273-1800	0,59	0,34
Oxigênio	O <sub>2</sub>	6,085	0,3631	-0,1709	0,3133	273-1800	1,19	0,28
Ar		6,713	0,04697	0,1147	-0,4696	273-1800	0,72	0,33
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	6,952	-0,04576	0,09583	-0,2079	273-1800	1,01	0,26
Monóxido de carbono	CO	6,726	0,04001	0,1283	-0,5307	273-1800	0,89	0,37
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	5,316	1,4285	-0,8362	1,784	273-1800	0,67	0,22
Vapor de água	H <sub>2</sub> O	7,700	0,04594	0,2521	-0,8587	273-1800	0,53	0,24
<b>Gases de combustão (intervalo grande)</b>								
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	6,529	0,1488	-0,02271	-	273-3800	2,05	0,72
Oxigênio	O <sub>2</sub>	6,732	0,1505	-0,01791	-	273-3800	3,24	1,20
Ar	H <sub>2</sub>	6,557	0,1477	-0,02148	-	273-3800	1,64	0,70
Hidrogênio	CO	6,424	0,1039	-0,007804	-	273-3800	2,14	0,79
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Veja nota no fundo da página*	-	-	-	273-3800	2,65	0,54
Monóxido de carbono	CO	6,480	0,1566	-0,02387	-	273-3800	1,86	1,01
Vapor de água	H <sub>2</sub> O	6,970	0,3464	-0,04833	-	273-3800	2,03	0,66
<b>Compostos sulfurados</b>								
Enxofre	S <sub>2</sub>	6,499	0,5298	-0,3888	0,9520	273-1800	0,99	0,38
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	6,157	1,384	-0,9103	2,057	273-1800	0,45	0,24
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	3,918	3,483	-2,675	7,744	273-1800	0,29	0,13
Sulfureto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	7,070	0,3128	0,1364	-0,7867	273-1800	0,74	0,37
Disulfureto de carbono	CS <sub>2</sub>	7,390	1,489	-1,096	2,760	273-1800	0,76	0,47
Sulfureto de carbonilo	COS	6,222	1,536	-1,058	2,560	273-1800	0,94	0,49

\* Reimpressão autorizada. No artigo original, as constantes também se dão para T, em graus Celsius, graus Fahrenheit e graus Rankine.

\* Equação para CO<sub>2</sub>, 273 a 3800 K:  $c_p^* = 18,036 - 0,00004474T - 158,08 \sqrt{T}$

Tabela H. 2 – Expressões para o método  $\varepsilon$ -NTU [13]

Disposição das correntes	Expressões
Permutador com uma só passagem em co-corrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU_{\min}(1 + C^*)]}{1 + C^*}$
Permutador com uma só passagem em contra-corrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU_{\min}(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU_{\min}(1 - C^*)]}$
Permutador de carcaça e tubos com uma passagem na carcaça e 2, 4, ... passagens nos tubos	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C^* + \left( 1 + (C^*)^2 \right)^{1/2} \frac{1 + \exp[-NTU_{\min} (1 + (C^*)^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NTU_{\min} (1 + (C^*)^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
Permutador de carcaça e tubos com $n$ passagens na carcaça e $2n, 4n, \dots$ passagens nos tubos	$\varepsilon = \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C^*}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C^*}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C^* \right]^{-1}$
Permutador de fluxo cruzado (uma passagem) com ambos os fluidos não misturados	$\varepsilon = 1 - \exp \left[ \left( \frac{1}{C^*} \right) NTU_{\min}^{0.22} \left\{ \exp[-C^* NTU_{\min}^{0.78}] - 1 \right\} \right]$
Permutador de fluxo cruzado (uma passagem) com $C_{\max}$ para o fluido misturado e $C_{\min}$ para o não misturado	$\varepsilon = \left( \frac{1}{C^*} \right) \left( 1 - \exp \left\{ -C^* \left[ 1 - \exp(-NTU_{\min}) \right] \right\} \right)$
Permutador de fluxo cruzado (uma passagem) com $C_{\min}$ para o fluido misturado e $C_{\max}$ para o não misturado	$\varepsilon = 1 - \exp \left( - (C^*)^{-1} \left\{ 1 - \exp[-C^* NTU_{\min}] \right\} \right)$
Todos os permutadores quando $C^* = 0$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU_{\min})$